ORSAY 243

Numéro d'ordre : 243

THESE

présentée

à l'UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

Pour obtenir le grade de Docteur-Ingénieur

par

GUY JAUNET

Sujet : CONTRIBUTION AU CENTRAGE DES SURFACES OPTIQUES SPHERIQUES

Soutenue le 9 Avril 1976 devant la commission d'examen :

MM. A. MARECHAL — Président

J. BABOZ
E. HUGHES
C. IMBERT
J.P. MARIOGE
} Examinateurs

ORSAY

Numéro d'ordre :

THESE

présentée

à l'UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

Pour obtenir le grade de Docteur-Ingénieur

par

GUY JAUNET

Sujet : CONTRIBUTION AU CENTRAGE DES SURFACES OPTIQUES SPHERIQUES

Soutenue le 9 Avril 1976 devant la commission d'examen :

MM. A. MARECHAL — Président

J. BABOZ
E. HUGHES
C. IMBERT
J.P. MARIOGE
} Examinateurs

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Je remercie Monsieur le Professeur MARECHAL, qui a bien voulu accepter la direction bienveillante de ma préparation de thèse à l'Institut d'Optique, et la présidence de mon jury.

Je tiens à remercier vivement Monsieur MARIOGE qui, par son grand intérêt pour mes travaux et ses conseils de tous les instants, a su guider mes efforts tout au long de cette entreprise ambitieuse.

J'exprime toute ma gratitude à Messieurs BONINO et MULLOT pour leur complicité active et efficace, sans laquelle les nombreux essais et contrôles parsemant cette étude n'auraient sans doute pas abouti.

Que le bureau d'études, principalement Monsieur LABADIE, Monsieur CONTET et l'atelier de mécanique, Monsieur THIERRY et ses collègues de l'atelier d'optique, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour leur collaboration diligente, qui a permis la réalisation et la mise au point des appareils décrits dans ce mémoire. J'y associe également Madame FARFAL et Monsieur HARTMANN pour la conception et la mise au point de l'importante partie électronique.

Je remercie enfin Madame HOFFEURT, qui a bien voulu dactylographier le texte de cette thèse, ainsi que tous ceux qui, par leurs conseils avisés ou simplement leur collaboration momentanée, m'ont permis de progresser et de préparer cette thèse dans de bonnes conditions.

Cette étude a été financée par le Centre Technique des Industries Mécaniques et le Centre National de la Recherche Scientifique .

P L A N

I. INTRODUCTION

II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE :

A. Généralités

B. Amélioration des méthodes classiques de centrage avec listel :

1. Méthode de débordage avec listel
2. Méthode de débordage avec deux listels, centrage-débordage en "cloche".
3. Méthodes de détection

C. Méthodes n'utilisant pas de listel

III. METHODE DE REGLAGE DE LA LENTILLE :

A. Méthodes possibles

1. Centrage débordage avec un listel
2. Méthode utilisant un doigt de centrage flexible.
3. Méthode utilisant un listel et une fixation par aspiration.
4. Méthodes n'utilisant pas de listel.

B. Méthode retenue pour les essais

1. Choix de la broche
2. Fabrication du listel
3. Collage lentille-listel
4. Description du dispositif mécanique de centrage.

IV. METHODES DE DETECTION EXPERIMENTEES

V. METHODES DE DETECTION RETENUES

A. Détection interférométrique :

1. Choix du type d'interféromètre
2. Mesure visuelle - possibilités et limitations
3. Mesure photoélectrique
4. Description du montage réalisé.
5. Sensibilité expérimentale.

.../...

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548114_0025

B. Méthode de détection photoélectrique

1. Principe et possibilités d'utilisation

a - Méthode de détection par transmission

b - Méthode de détection associant l'appareil "transmission et un comparateur de précision.

c - Méthode de détection par transmission et réflexion.

2. Avantage de ces méthodes

3. Sensibilité théorique

a - Principe opto-électronique

b - Sensibilité théorique

4. Dispositif de détection par transmission :

a - Description

b - Sensibilité expérimentale

5. Dispositif de détection par réflexion

a - Description

b - Sensibilité expérimentale

VI. RESULTATS

VII. DETECTION DE L'ELEMENT DEFAILLANT D'UN OBJECTIF MONTE :

Introduction

A. Principe général

B. Dispositifs de mesure

1. Utilisation d'un axicon

a - Principe

b - Montage expérimental

c - Résultats

2. Systèmes à dédoublement d'images

a - Principe

b - Méthode des deux équerres optiques

c - Méthode d'alignement de J. TERRIEN utilisant un système à double image.

VIII. CONCLUSION

ANNEXE

REFERENCES

NOTATIONS

I. INTRODUCTION :

Les instruments d'optique sont généralement composés d'un ensemble de surfaces sphériques, qui forment un système centré. Ceci nécessite que les centres de courbure des différents dioptres soient placés sur une même droite. Une série d'opérations permet de réaliser cette condition. La fabrication des systèmes optiques de haute précision (objectifs de microscopie, objectifs photoréducteurs, objectifs de photogrammétrie) se heurte actuellement à l'insuffisance des méthodes de centrage, qui ne permettent pas d'éviter en toute sécurité les défauts d'excentrement des lentilles.

Pour faire coïncider l'axe optique d'une lentille avec l'axe mécanique de l'instrument qui doit la contenir, il faut résoudre deux grands problèmes :

- la mise au point d'un appareil de détection d'excentrement. Il doit permettre de mesurer avec précision l'excentrement d'une lentille, et aider l'opérateur à réduire ce défaut jusqu'à la valeur optimale,

- la mise au point d'un ensemble mécanique qui permette de régler les surfaces optiques dans les tolérances voulues, et de pratiquer l'usinage du pourtour de la lentille pour son montage dans l'instrument.

Les performances demandées à certains objectifs nécessitent parfois des tolérances extrêmement sévères sur la position des éléments. Actuellement, dans les cas les plus délicats, il est nécessaire que l'erreur sur l'excentrement soit inférieure à :

- 2 mirrons en translation,
- 10 secondes d'arc pour des lentilles de dimensions usuelles et 1 minute pour des lentilles de petites dimensions (microscopie) pour l'inclinaison.

Nous avons essayé d'atteindre ces limites, fixées par les industriels de l'optique, qui sont à l'origine de cette étude.

A. GENERALITES

Le calculateur qui étudie un instrument d'optique admet que les centres de courbure des dioptres sphériques sont parfaitement alignés sur l'axe optique du système. Si cette condition n'est pas réalisée, les excentrements donnent lieu à des altérations de l'image analogues aux aberrations géométriques classiques [1]. Elles peuvent réduire de façon importante les performances du système précédemment calculé. Pour réduire ces défauts, il est nécessaire de connaître avec quelle tolérance il faut placer les centres des dioptres successifs sur une même droite, et d'adapter les méthodes de fabrication à ces résultats. Dans un instrument classique, les positions relatives des divers lentilles ou groupes de lentilles sont assurées par le respect des tolérances de montage des verres dans les montures et des montures dans le corps de l'instrument. Cette seconde difficulté étant du domaine purement mécanique, nous ne l'étudierons pas ici. Par contre, nous allons développer les méthodes actuelles permettant de centrer un élément optique dans sa monture.

Les principales méthodes utilisées nécessitent une opération appelée débordage, qui consiste à usiner sur le pourtour de la lentille un cylindre dont l'axe contient les centres des surfaces sphériques. Il suffit ensuite de glisser le verre dans sa monture pour confondre, aux jeux et défauts d'usinage près, les axes de la mécanique et de l'optique.

Pour matérialiser une droite dans l'espace, on utilise généralement la rotation d'une broche de bonne qualité. Cette broche sert de support à la lentille lors du débordage. Au préalable, il faut placer les deux centres de courbure sur son axe.

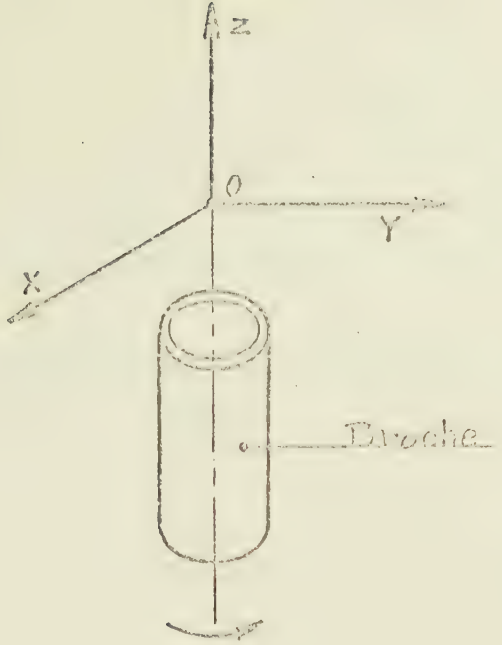
Soit un système de coordonnées orthogonales Oxyz ayant l'axe Oz confondu avec l'axe de la broche (fig.1). Considérons que ce système de référence tourne avec la lentille. La position des dioptres peut être repérée par les coordonnés (x_1,y_1) et (x_2,y_2) des centres de courbures C_1 et C_2 des deux surfaces.

Nous distinguerons deux types de méthodes :

* les méthodes très employées qui utilisent un listel et qui permettent de régler automatiquement les coordonnées x_1,y_1 ou x_2,y_2.
* les méthodes n'utilisant pas de référence et qui nécessitent par conséquent le réglage des quatre coordonnées.

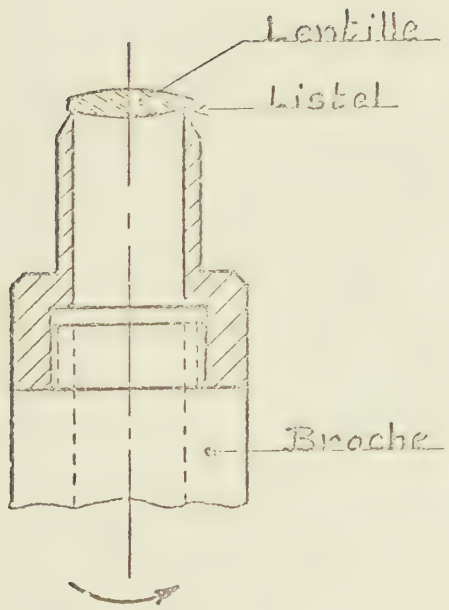
Il existe également deux méthodes plus nouvelles supprimant l'opération de débordage du verre. La première consiste à usiner la monture avec précision et à la régler sur l'axe de la broche. La lentille est alors centrée sur le même axe et collée dans sa monture. Le deuxième procédé nécessite un collage préalable de la lentille dans sa monture uniquement ébauchée. Les centres des

.../...



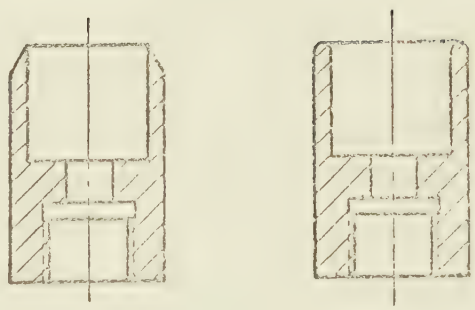
Trièdre de référence

Fig. 1



Montage Broche - listel

Fig. 2



Deux types de "listels"

Fig. 3

faces sphériques sont ensuite placés sur l'axe de la broche, comme si on voulait procéder à l'usinage du verre mais, cette fois, c'est la monture qu'on déborde. Dans ces deux cas, on diminue les erreurs dues à une mauvaise position de la lentille dans son logement.

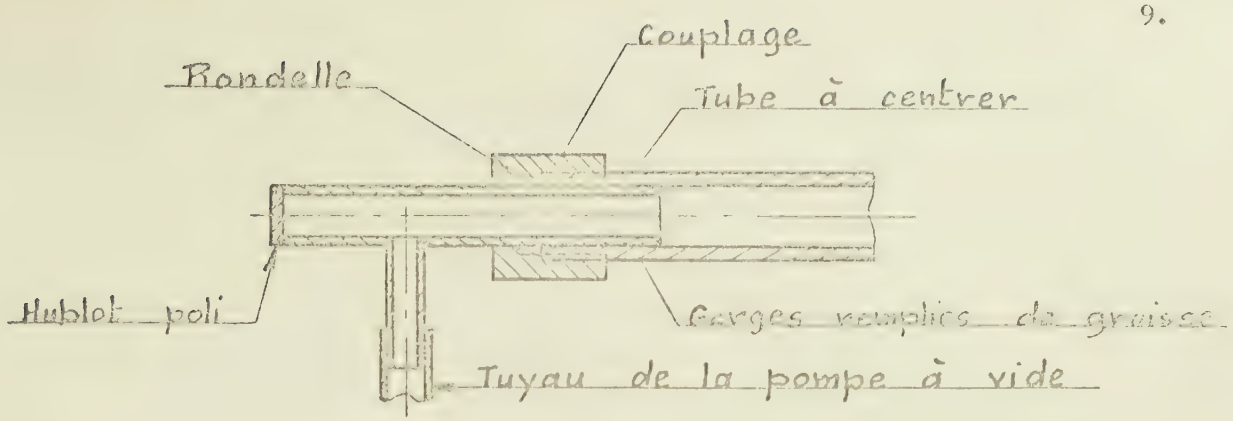
B. AMELIORATION DES METHODES CLASSIQUES DE CENTRAGE ET DE DEBORDAGE AVEC LISTEL

1. Méthode de débordage avec un listel

Au bout de la broche est monté un tube dont l'extrêmité est parfaitement rectifiée (fig.2 et 3). On obtient ainsi une arête tranchante circulaire appelée listel contenue dans un plan perpendiculaire à l'axe de la broche et dont le centre est situé sur cet axe. Par abus de langage nous appellerons toujours listel l'extrêmité du tube supportant la lentille, même si ce n'est pas une arête vive, mais par exemple une portion de tore (fig.3). Dans tous les cas, si le listel est bien usiné, le contact avec la lentille se fait suivant un cercle centré sur l'axe de la broche. En appliquant une surface sphérique sur l'arête, on est sûr de placer son centre de courbure sur l'axe de rotation. La précision du réglage dépend de la qualité du listel et de la fixation de la lentille. En faisant glisser la surface contre le biseau on peut placer le deuxième centre de courbure sur l'axe de la broche. Quand la lentille est "centrée", il est nécessaire de la fixer avant le débordage.

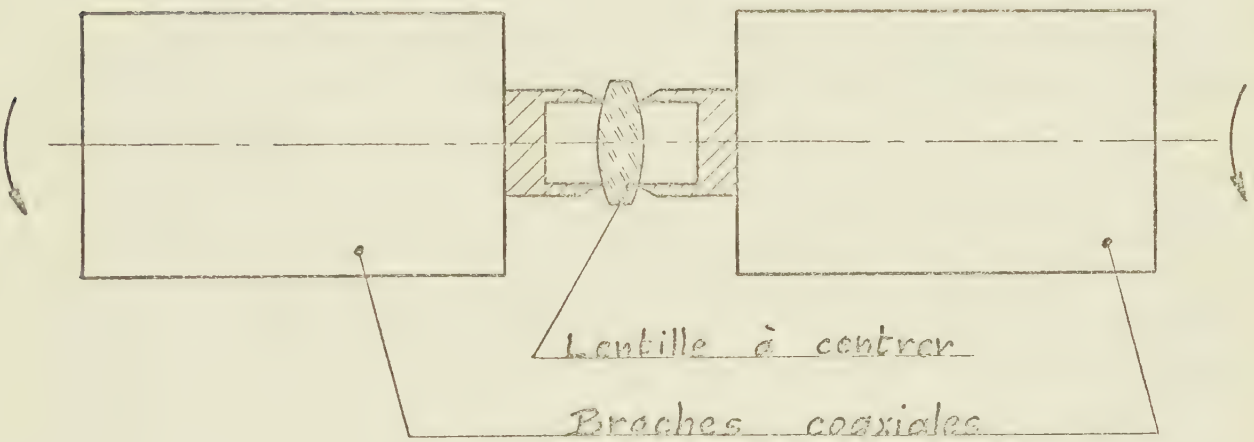
La fixation la plus traditionnelle se fait à l'aide d'un ciment spécial utilisé à chaud qui durcit en se refroidissant. Ce ciment présente l'avantage d'être stable mécaniquement et de permettre à chaud un réglage de la lentille. Malheureusement, les chauffages et refroidissements successifs risquent d'engendrer des déformations des pièces mécaniques. Pour supprimer ce ciment on a envisagé de tenir le verre par aspiration [2]. On plaque la lentille contre le listel en créant une dépression dans la broche. Un système de passages tournants étanches permet la liaison avec la pompe à vide (fig.4). Un vide primaire (de l'ordre de 10^{-3} mm Hg) suffit pour maintenir la lentille et permet le glissement de la face inférieure sur le listel. Cette méthode semble d'une grande souplesse. Malheureusement, elle nécessite quand même un collage de la lentille sur le tube pour éviter un déplacement lors du débordage.

.../...



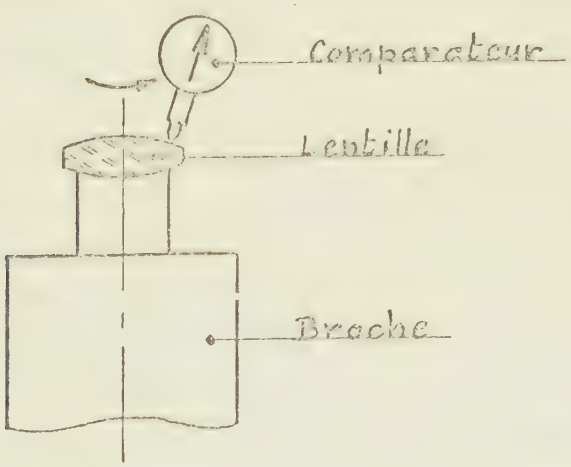
Vue partielle du système de centrage par aspiration

Fig. 4



Méthode de centrage "en cloche"

Fig. 5



Centrage mécanique avec un comparateur

Fig. 6

2. Méthode de débordage avec deux listels-centrage débordage en cloche [2] :

Ce procédé utilise deux broches coaxiales (fig.5). A leur extrêmité sont usinés des listels qui viennent coincer la lentille. Les centres de courbure sont ainsi automatiquement placés sur l'axe commun des broches. Cette méthode très simple nécessite que les axes soient parfaitement alignés et les listels très bien usinés. Malheureusement, le glissement se fait mal quand les rayons de courbures sont trop grands, et le coincement de la lentille entre les listels engendre parfois des altérations de surface. On peut améliorer cette méthode, notamment en imprimant de légers mouvements de vibration à l'un des listels, ce qui permet une mise en place plus précise de la lentille [4] .

3. Méthodes de détection :

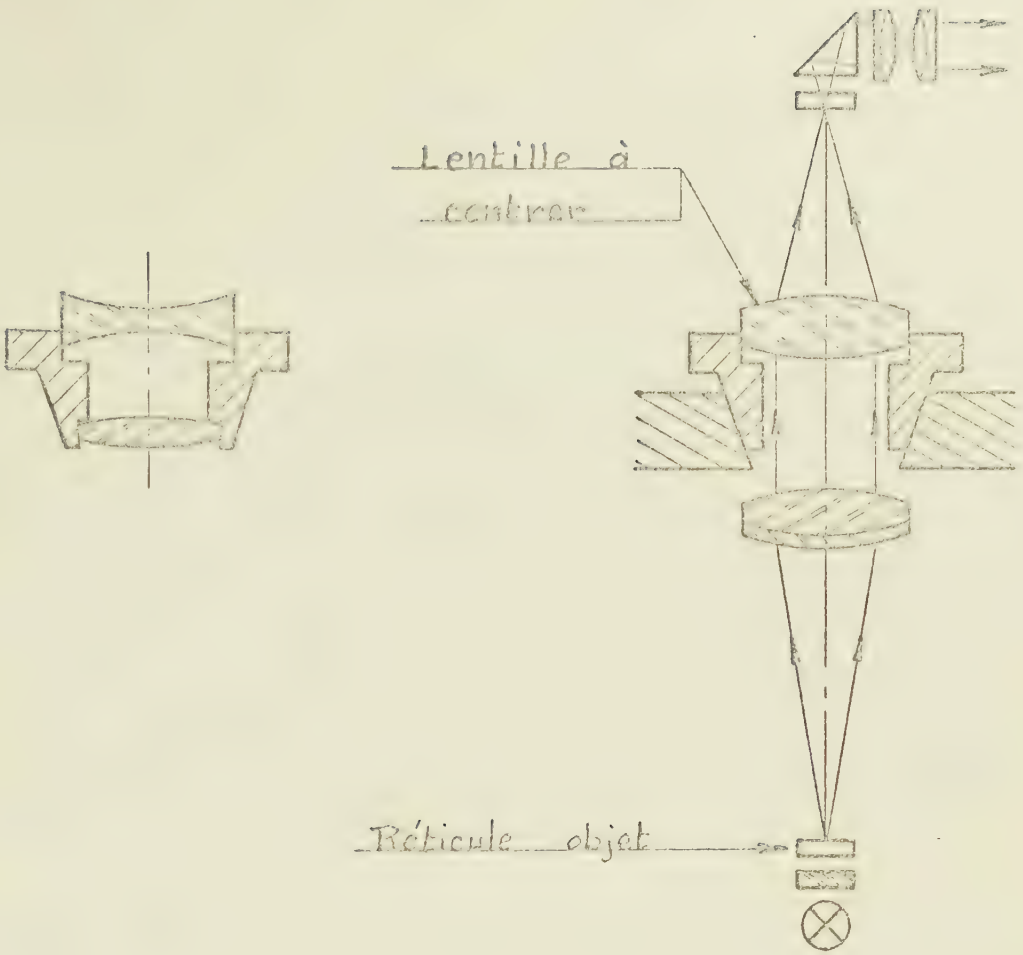
Dans tous les cas, il faut pouvoir détecter un mauvais centrage et mesurer les paramètres (au nombre de deux si le listel est parfait) sur lesquels on doit jouer pour centrer la lentille.

La première méthode est mécanique. On admet que la surface appuyant sur le listel est bien réglée et on contrôle uniquement la face supérieure. La touche d'un comparateur appuie sur ce dioptre animé d'un mouvement de rotation (fig.6). Pour le réglage on fait glisser la lentille sur le listel et on annule le mouvement de l'aiguille du comparateur. Ce dispositif est simple et précis, mais en général on ne peut pas contrôler la face inférieure.

Le deuxième procédé, très classique, porte le nom de "centrage à la lumière". L'opérateur observe successivement grâce à un système optique, les images du filament d'une lampe, réfléchies par les surfaces. Lorsque ces dioptres ne sont pas réglés, les images réfléchies tournent avec la lentille. Lorsque le centrage est parfait ces images restent immobiles. Actuellement, cette méthode est la plus employée, mais bien que relativement précise , elle manque de commodité.

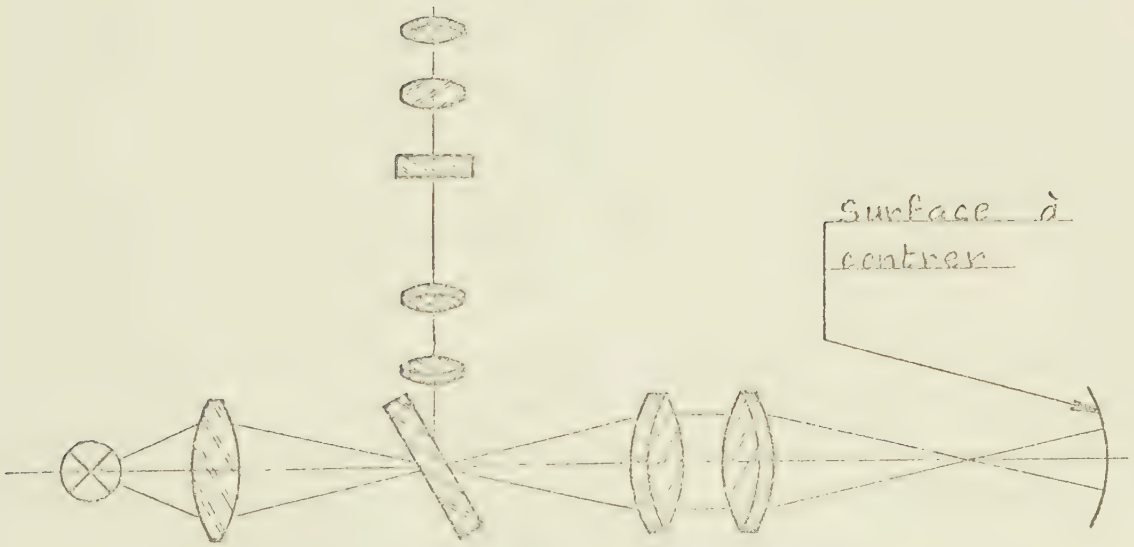
Du principe de cette méthode sont issus d'autres procédés visuels plus élaborés. On peut, par exemple [3,5] , observer au foyer de la lentille l'image d'un réticule situé dans le plan focal d'un collimateur (fig.7). L'observation se fait à l'aide d'un oculaire, muni d'un réticule objet. Si la lentille est parfaitement centrée, le réticule image reste immobile lors de la rotation.

Un autre dispositif mis au point en URSS [3], utilise non plus l'image donnée par transmission à travers la lentille, mais la réflexion sur une des faces. L'image du réticule est formée au centre de courbure de la face à régler, à l'aide d'un objectif à focale variable (fig.8). Cet objectif permet de modifier la convergence du faisceau et de l'adapter aux différents rayons de courbure des surfaces. Après autocollimation l'image du réticule est renvoyée dans



Centrage par transmission

Fig. 7



Centrage par autocollimation

Fig. 8

le champ d'un microscope par une séparatrice. Si la lentille fixée sur la broche en rotation est excentrée, on voit l'image bouger dans l'oculaire du microscope. Ce dispositif ainsi que ses variantes peuvent se monter facilement sur un tour à centrer et semblent très utilisés dans l'industrie soviétique.

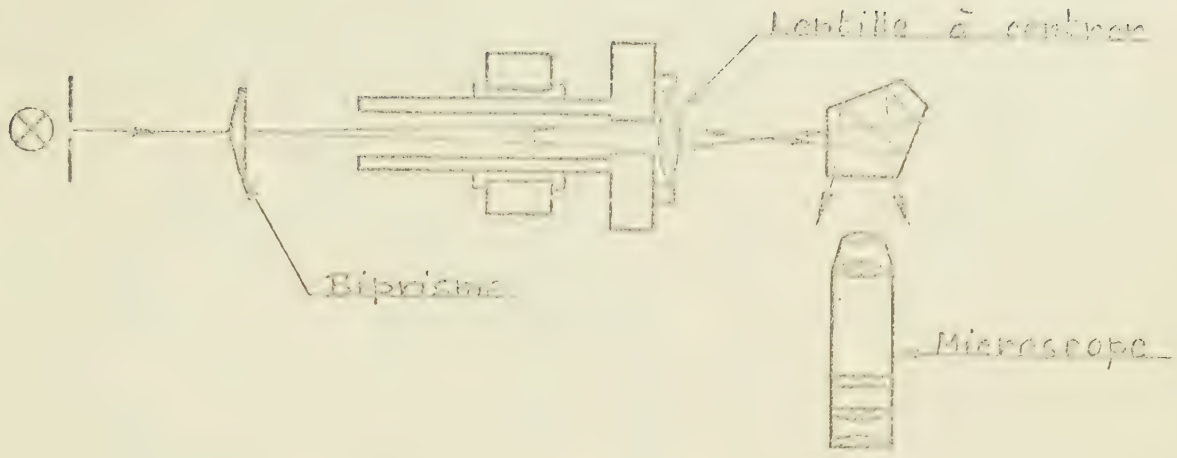
Un procédé très récent, mis au point par SPINDLER et HOYER, adaptable sur les machines LOH possède les caractéristiques suivantes : un générateur laser projette un rayon à travers la lentille à centrer ou à contrôler. Ce rayon repris par un jeu de miroirs parcourt un trajet réglable au choix de 2; 6,80 ou 11 mètres et se matérialise par un point lumineux sur un écran de contrôle gradué. Un système optique réglable permet dès la sortie du générateur, de focaliser ou d'étaler le rayon laser à volonté . Une abaque accompagne l'appareil donnant les erreurs de centrage en fonction du diamètre de rotation du point lumineux sur l'écran et de l'indice de réfraction du verre. La sensibilité de l'appareil permet de centrer les verres avec une précision de 10 secondes avec le trajet de 11m, et de 20 secondes avec le trajet de 6,80 m . Mais cette sensibilité ne serait valable que pour des lentilles de focale supérieure à 100 mm. Le trajet de 2m est utilisé pour dégrossir le centrage de lentilles à rayon relativement court et à régler l'appareil .

La dernière méthode visuelle que nous évoquerons fait appel à des considérations totalement différentes [6] . Des franges d'interférences à deux ondes, du type franges d'Young, sont formées à l'aide d'un bi-prisme de Fresnel ou d'un dispositif similaire. On interpose la lentille à centrer et on observe le déplacement de la frange centrale quand la lentille tourne. Ce principe peut être utilisé soit par transmission à travers la lentille (fig.9), soit par réflexion sur ses faces (fig.10).

Les deux procédés suivants utilisent des détecteurs photoélectriques pour mesurer le déplacement de l'image ou du faisceau. Ces systèmes opto-électroniques présentent plusieurs avantages. Les opérations de centrage nécessitent beaucoup d'habileté, et il est difficile de concentrer simultanément son attention sur l'observation du mouvement d'une image et sur le réglage de la lentille. Enfin, l'automatisation du procédé de centrage-débordage étant vivement souhaitée, il fallait remplacer l'oeil par des détecteurs.

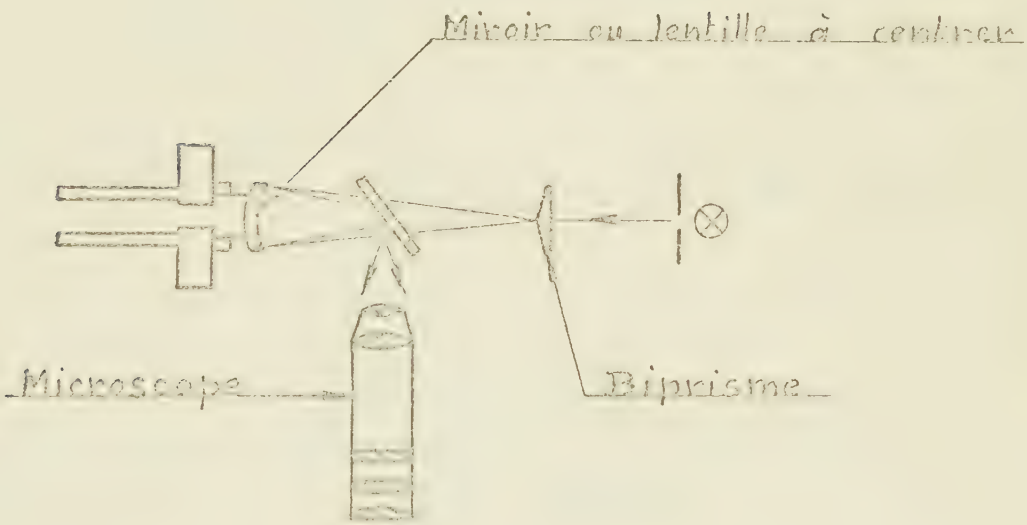
La première méthode opto-électronique [7] utilise la déviation d'un pinceau lumineux convergent au centre optique de la lentille à centrer. Après passage dans la lentille, ce pinceau est réfléchi par une pyramide qui envoie une partie du flux sur chacune des quatre cellules photoélectriques disposées comme le montre la figure 11. On peut noter la position verticale renversée de la broche que permet une fixation par aspiration. Les signaux 1,2,3 et 4 issus des quatre détecteurs sont amplifiés, et on fait les différences 1-3 et 2-4. Si la lentille est parfaitement centrée, le faisceau transmis est stable et les différences 1-3 et 2-4 sont constan-

.../...



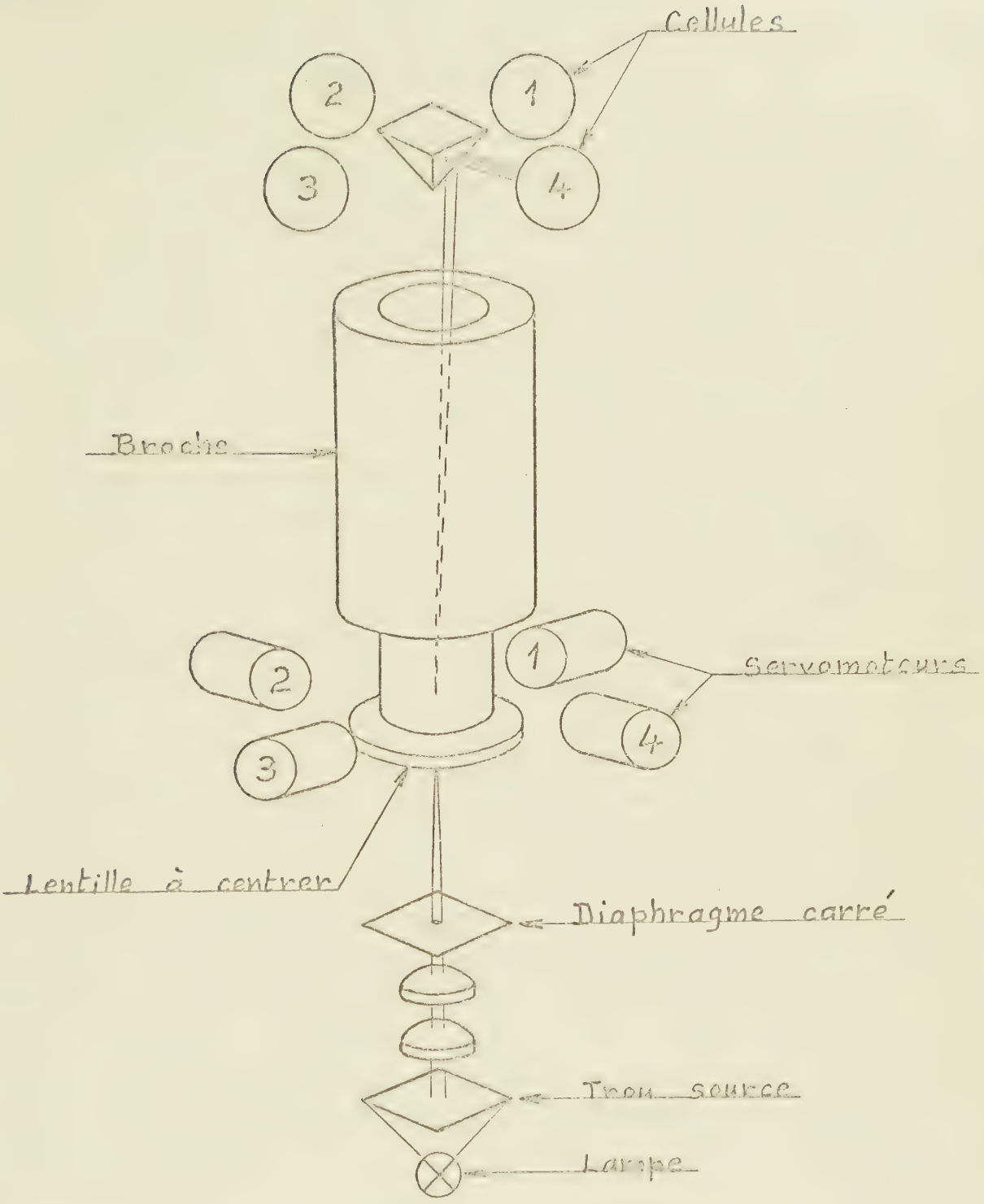
Centrage interférentiel par transmission
(Biprisme de Fresnel)

Fig. 9



Centrage interférentiel par réflexion
(Biprisme de Fresnel)

Fig. 10



Centrage automatique par transmission

Fig. 11

tes. Dans le cas contraire, ces deux signaux sont utilisés pour piloter des moteurs pas à pas qui règlent la lentille. Ce procédé permet donc l'automatisation complète du centrage, si on admet que la face appliquée sur le listel est bien centrée.

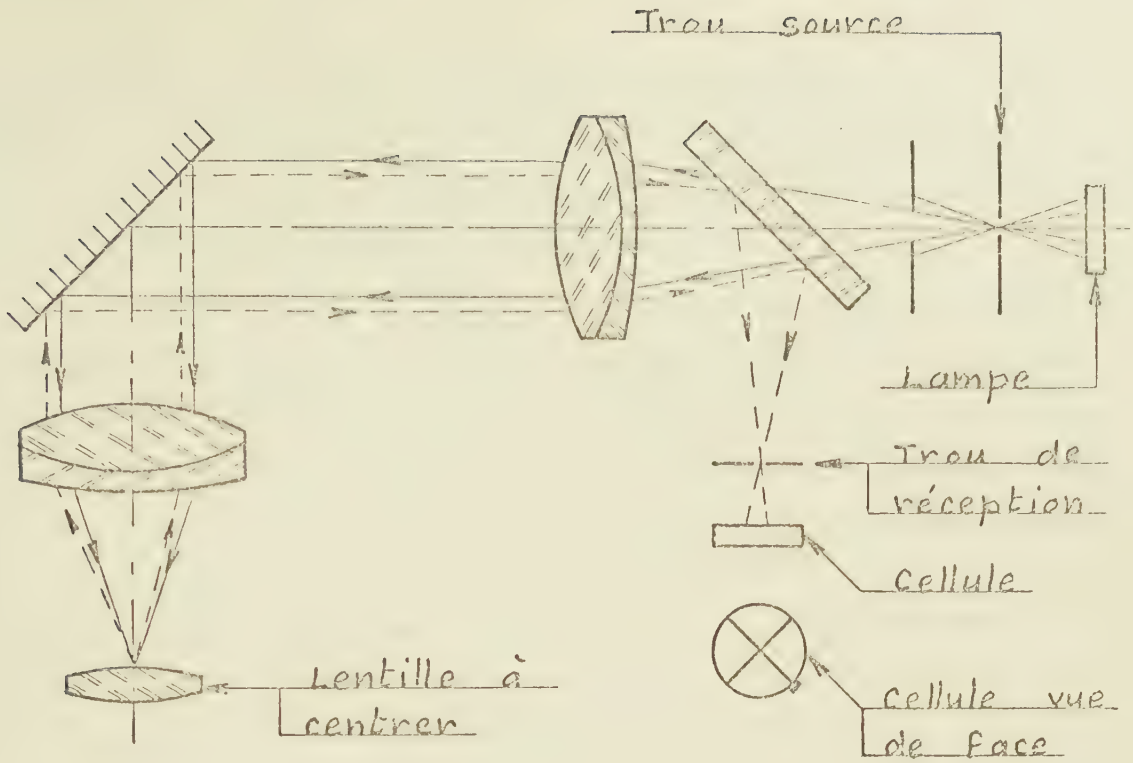
L'appareil [8] que nous allons décrire permet de mesurer automatiquement et successivement le centrage des deux surfaces. C'est un moyen de détection applicable uniquement si on utilise la méthode de débordage avec un listel. Le récepteur est une cellule photoélectrique à quatre quadrants, qui remplace avantageusement l'ingénieux système précédent composé d'un prisme et de quatre détecteurs. Cette cellule comprend quatre secteurs qui constituent quatre détecteurs indépendants (fig.12). Comme précédemment, on fait la différence des signaux 1-3 et 2-4. L'image du trou source est formée sur la surface à centrer.

Le faisceau réfléchi par cette surface est transmis par l'optique de focalisation, puis après réflexion sur la séparatrice, est focalisé sur un trou épurateur situé devant le récepteur. Ce trou est conjugué de la surface de la lentille, donc du trou source. Si la focalisation est bien faite (un dispositif spécial permet de réaliser cette condition), le faisceau réfléchi passe toujours dans ce trou de réception même si la surface à centrer est inclinée. Quand le dioptre étudié tourne, le faisceau éclairant le détecteur tourne également autour du trou épurateur. Les signaux issus de la photodiode sont traités électroniquement comme précédemment, et donnent naissance à un spot sur l'écran d'un oscilloscope. Le diamètre du cercle décrit par ce spot est proportionnel à l'inclinaison de la lentille. Pour centrer la surface considérée, il suffit de réduire ce cercle à un point. Le système optique permet de focaliser indifféremment sur les deux faces de la lentille, et donc de vérifier le centrage de la face inférieure quand le dioptre supérieur a été réglé. L'épaisseur de la lentille doit être inférieure à 25 mm. La sensibilité est d'environ 10 secondes d'arc, ce qui explique qu'on se préoccupe du centrage de la face inférieure pour être sûr qu'elle appuie sur le listel.

C - METHODES N'UTILISANT PAS DE LISTEL:

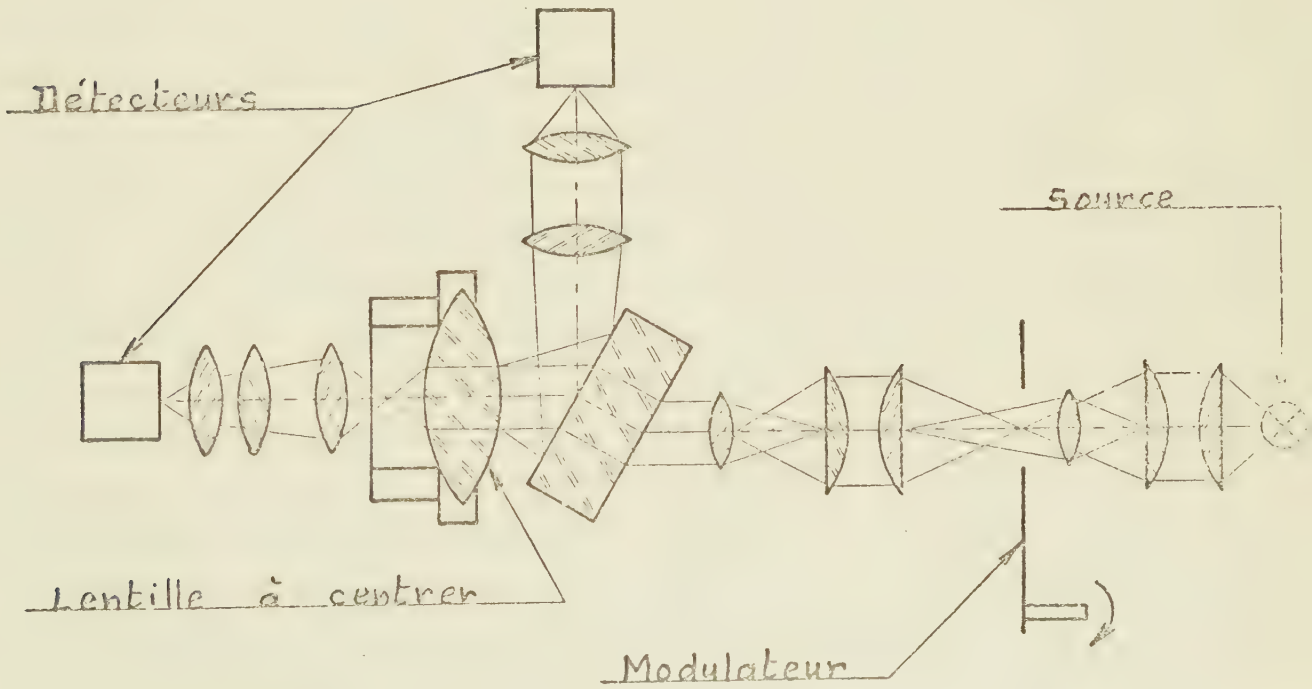
Ces méthodes se proposent d'atteindre une très grande précision de l'ordre du micron et de la seconde, et surtout l'automatisation complète si possible. Pour celà, on élimine le listel qui risque d'avoir des imperfections et on cherche à supprimer la phase intermédiaire du glissement de la lentille dans son barillet. L'automatisation nécessite des méthodes

.../...



"Lens centring gauge" SIRA - BECK

Fig. 12



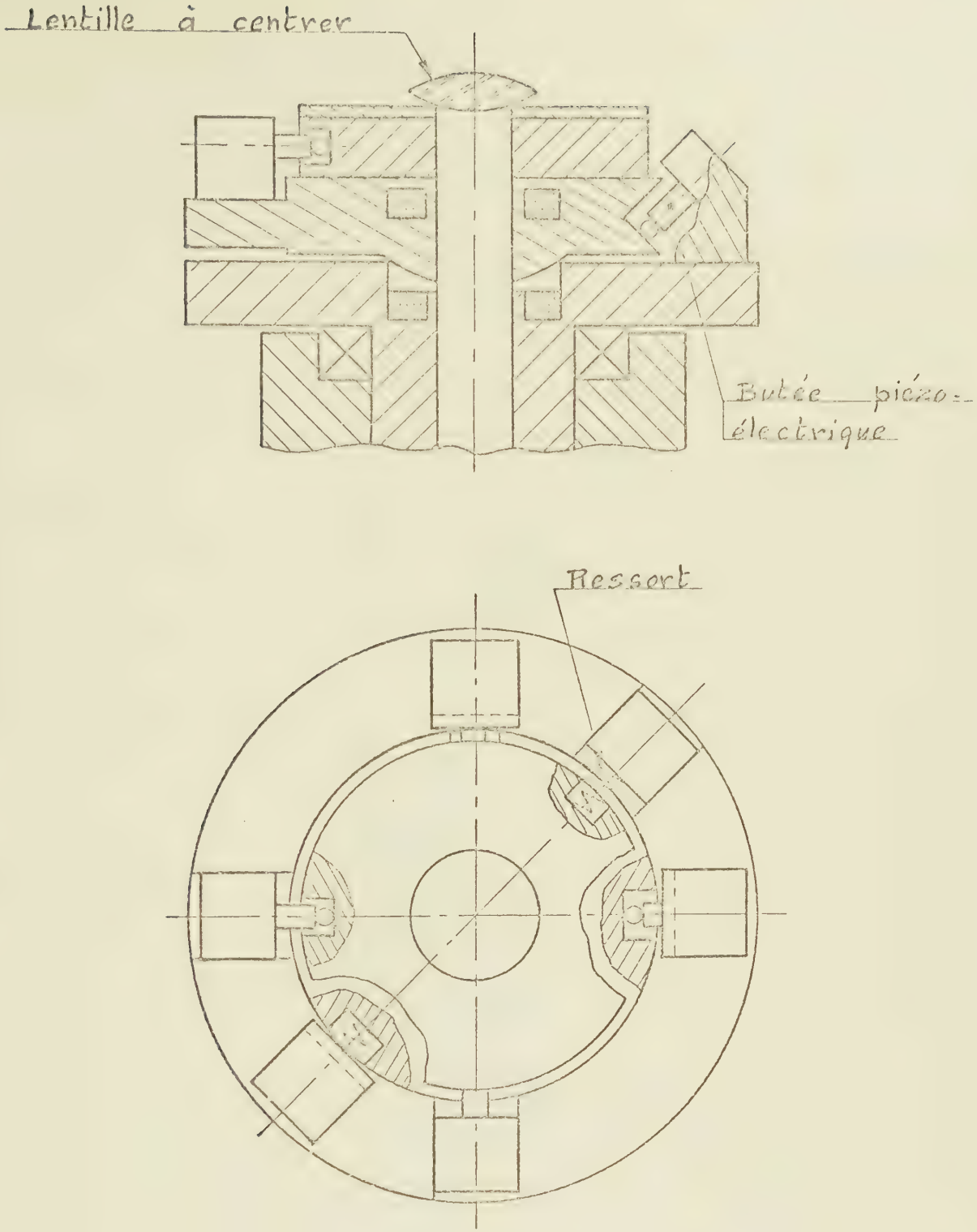
Système automatique de détection du centrage

Fig. 13

photoélectriques. Les trois procédés proposés utilisent des détecteurs à quatre quadrants . N'ayant plus de référence pour la face inférieure il faut centrer les deux faces. Il y a maintenant quatre paramètres à maîtriser et il est donc nécessaire de posséder quatre informations.

Le premier système [3] comporte une partie optique relativement classique. Un faisceau de lumière parallèle éclaire la lentille à centrer (fig. 13). On recueille le faisceau transmis et le faisceau réfléchi par la lentille sur deux détecteurs à quatre quadrants. Ces cellules fournissent des signaux qui permettent de régler la lentille en agissant sur le mandrin complexe schématisé sur la figure 14 . Le plateau supérieur supportant la lentille peut se translater dans deux directions perpendiculaires . Le plateau intermédiaire peut pivoter suivant deux axes orthogonaux autour d'une rotule. On agit bien ainsi sur les quatre degrés de liberté . Cette action se fait par l'intermédiaire de céramiques piezo-électriques agissant en opposition avec des ressorts. Pendant le réglage, les plateaux peuvent glisser librement. Lorsque le centrage est terminé, une impulsion électrique magnétise l'ensemble et immobilise le mécanisme .

Le système représenté à la figure 15 est sans doute le plus évolué puisqu'il met en oeuvre des moyens très puissants, dont un ordinateur [9]. Il est également le plus complexe même du point de vue optique . La particularité du procédé réside dans l'absence de débordage des lentilles et dans la possibilité de réglage d'un objectif complet en une seule opération.
Pour détecter le centrage des surfaces, on observe les mouvements de l'image obtenue par autocollimation au centre de courbure des faces de la lentille. Le dispositif optique comporte un laser comme source lumineuse et un objectif à focale variable adaptant la convergence du faisceau aux rayons de courbure des dioptres . Le moyen de contrôle d'une bonne focalisation n'est pas indiqué. Le faisceau réfléchi est recueilli par un détecteur à quatre quadrants percé en son centre d'un petit trou. La lentille est fixée sur un système mécanique possédant cinq mouvements indépendants, supporté par une broche de précision. Ces mouvements correspondent aux cinq paramètres de la lentille sur lesquels il faut jouer pour le centrage . Le cinquième est la coordonnée z que l'auteur se réserve ici le droit de modifier. A partir des coordonnées initiales et des signaux issus du détecteur à quatre quadrants, l'ordinateur déduit la position à donner à la lentille pour régler la face considérée . Il commande alors les divers mouvements de façon à lui donner cette position. Ces opérations effectuées on vérifie le centrage de la face en question et on recommence éventuellement jusqu'à un réglage parfait.



Support réglable permettant le centrage de la lentille sans utiliser de listel

Fig. 14

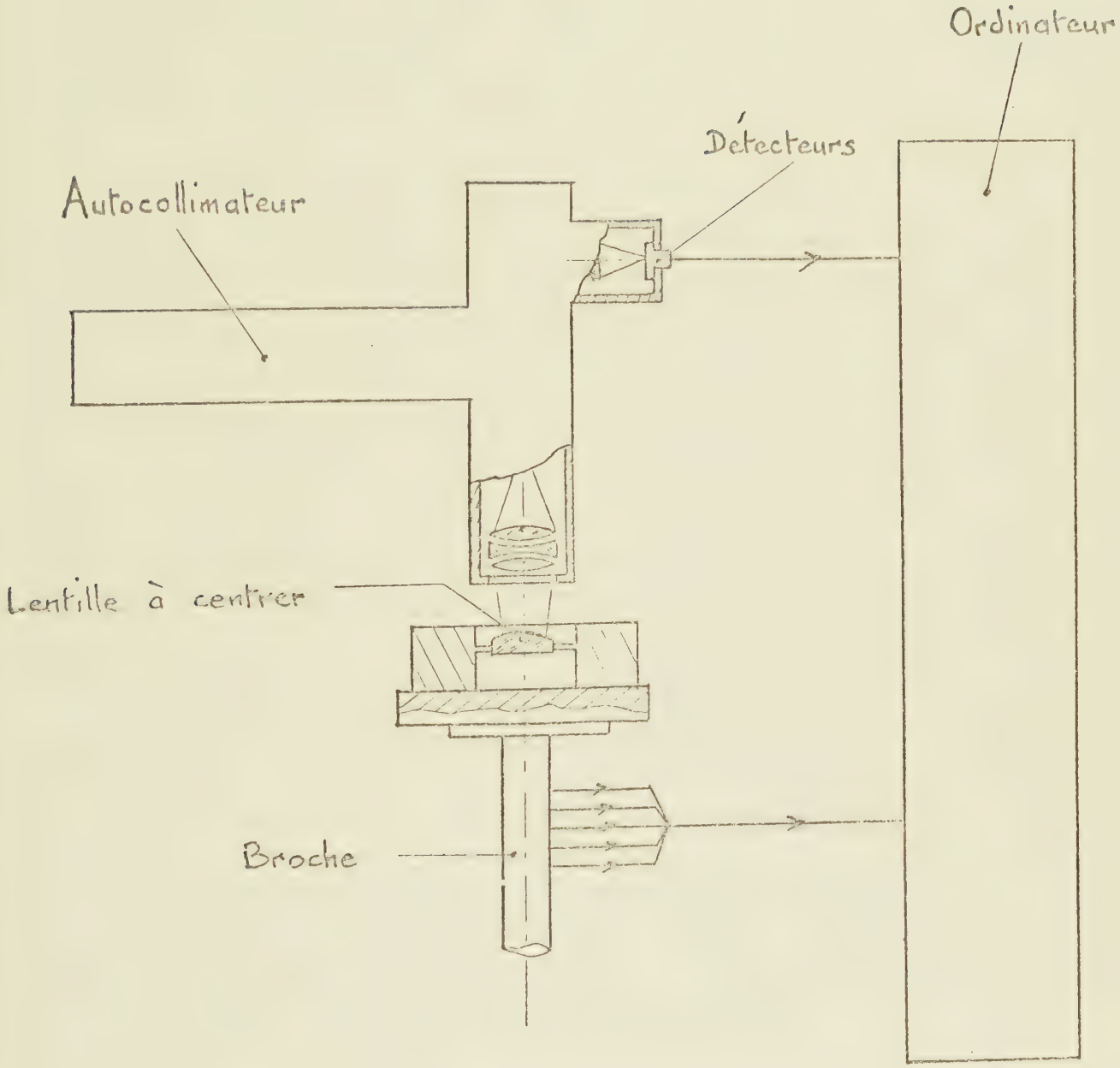


Figure 15 : Centrage automatique utilisant un ordinateur

On forme ensuite l'image de la source sur la surface en déplaçant verticalement l'autocollimateur. Lorsque la focalisation est parfaite, tout le flux réfléchi passe par le petit trou percé au centre du détecteur. Le récepteur situé derrière enregistre un maximum. On en déduit la position verticale de la surface par rapport à une surface de référence et donc celle de son centre de courbure.
On procède de façon identique pour l'autre face en veillant à ce que tous les déplacements se fassent autour du centre de courbure de la face déjà centrée. La première lentille étant ainsi réglée, on l'immobilise par collage. On place la seconde lentille à la distance appropriée à l'aide de bagues. On recommence l'opération de centrage et on colle à nouveau après réglage. On procède ainsi jusqu'à la mise en place de tous les verres de l'objectif .

Le dernier système [10] que nous décrirons est le seul où on ne fasse pas tourner la lentille et dont le principe soit très original. La source est un laser Hélium-Néon (fig. 16) dont le faisceau matérialise l'axe de référence . On utilise d'une part les faisceaux réfléchis par les deux faces de la lentille, d'autre part le faisceau transmis . Les faisceaux réfléchis sont cohérents entre eux et interfèrent On observe les anneaux non localisés à l'aide d'un oculaire. Son réticule est constitué de cercles concentriques dont l'espacement suit la loi des anneaux de Newton . En agissant sur les mouvements de rotation du support de la lentille, on confond les centres des deux systèmes d'anneaux . L'auteur annonce pour ce premier réglage une précision de $\pm$ 8 secondes d'arc. Cette incertitude résiduelle doit en fait dépendre des rayons de courbure des dioptres .Le faisceau laser transmis éclaire un détecteur à quatre quadrants. Si le faisceau est excentré, les signaux issus du détecteur pilotent deux servo-moteurs qui agissent sur deux glissières à axes perpendiculaires guidant le support de la lentille . On agit ainsi sur les deux paramètres de translation. L'auteur atteint par approches successives une précision de 0,25 μ en translation . Comme précédemment cette précision doit varier avec le rayon des surfaces . Le système complet de détection étant au préalable parfaitement réglé, quand les anneaux sont centrés et les signaux électriques annulés, l'axe de la lentille est confondu avec la droite de référence. La monture de la lentille est réglée indépendamment de façon que son axe soit cette même droite . On colle alors les deux éléments avec un produit qui n'est pas décrit .

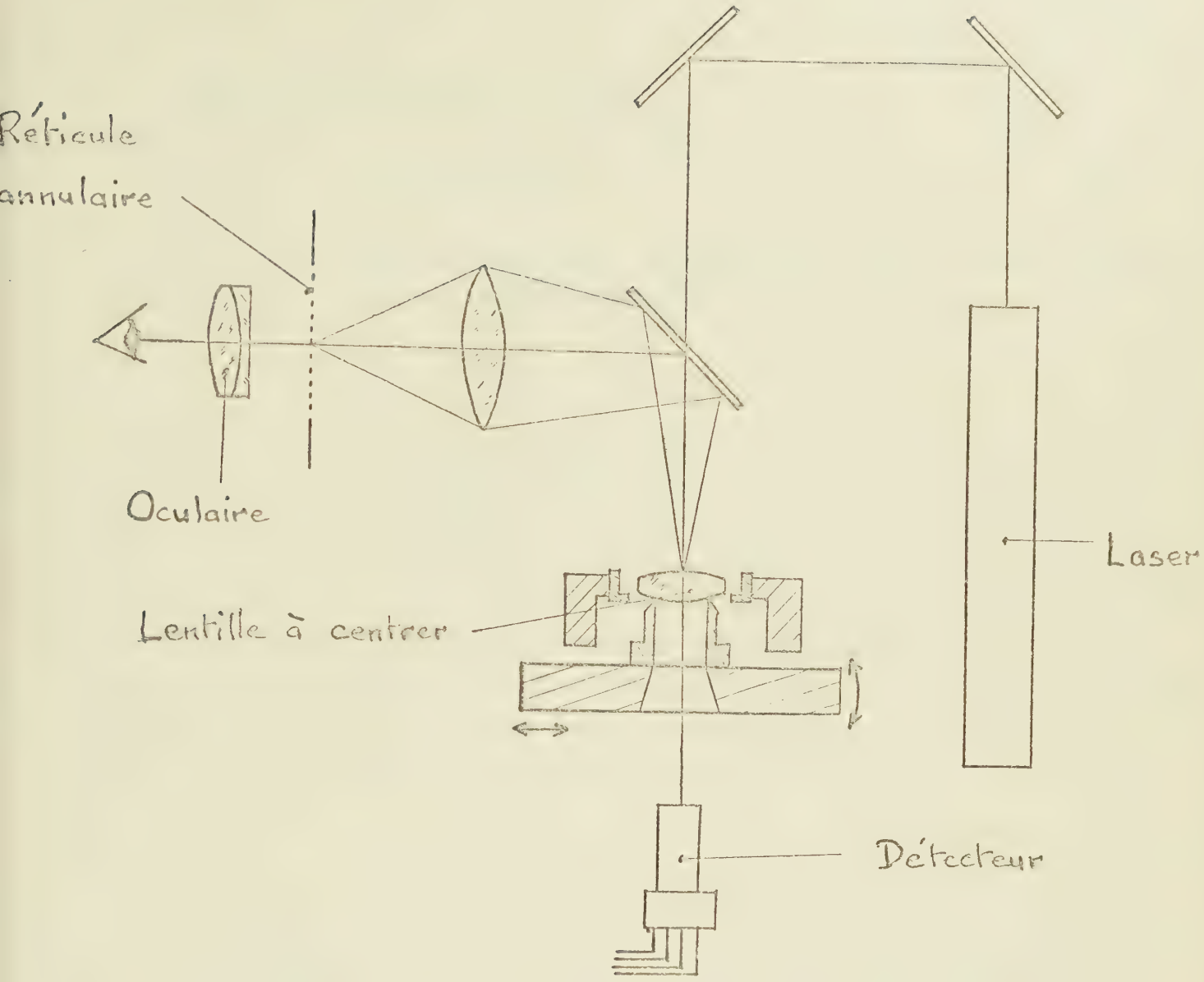


Figure 16 : Centrage interférométrique :

la lentille à centrer ne tourne pas.

III. METHODES DE REGLAGE DE LA LENTILLE :

A - Méthodes possibles

Parmi les procédés envisageables, nous avons sélectionné ceux qui permettent un réglage systématique et de grande précision.

1 - Centrage-débordage avec un "listel" :

Nous avons fait la description détaillée de ce procédé dans la revue bibliographique. Un travail soigné, notamment pour la fabrication du listel, permet d'atteindre une bonne précision. Le "ciment" thermodurcissable est commode au niveau de la fixation, mais désagréable pour le réglage car il faut chauffer constamment pour qu'il conserve sa plasticité. La précision de la méthode est limitée par le débordage qui donne au verre un état de surface insuffisamment régulier et perturbe l'ajustage verre barillet. On peut remédier à cet inconvénient en ajustant l'alésage du barillet au cylindre extérieur de la lentille et réaliser ainsi un montage n'ayant que quelques microns de jeu.

2 - Méthode utilisant un doigt de centrage flexible :

C'est B. BONINO , opticien de précision à l'I.O.T.A. qui est à l'origine de ce dispositif. Pour régler une lentille avec la méthode précédente, les opticiens utilisent un bâton rigide (généralement en ivoire) qui ne raye pas le verre. Avec ce bâton l'opérateur appuie sur la surface à centrer de façon à la placer dans sa position idéale (fig.17). Ce réglage manuel nécessite une grande habileté et on ne peut procéder que par tâtonnements.

Si l'on veut un réglage continu et automatique on peut recourir au dispositif représenté à la figure 18 , qui permet une variation de la force d'appui. La partie flexible est une lame de ressort. Une vis mobile permet de régler la pression du ressort en faisant varier la longueur de la partie élastique. Deux conditions doivent être respectées. Il faut :

- que la touche d'appui soit perpendiculaire à la surface à centrer.
- que le contact touche d'ivoire-verre se fasse au dessus de l'arête du listel.

.../...

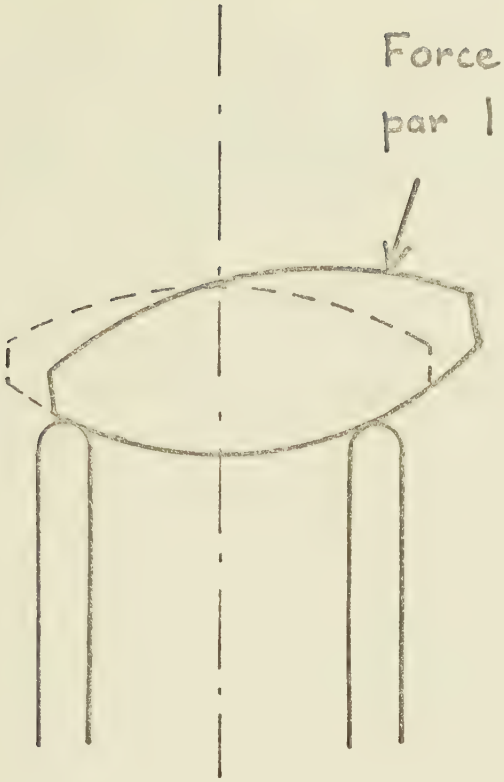
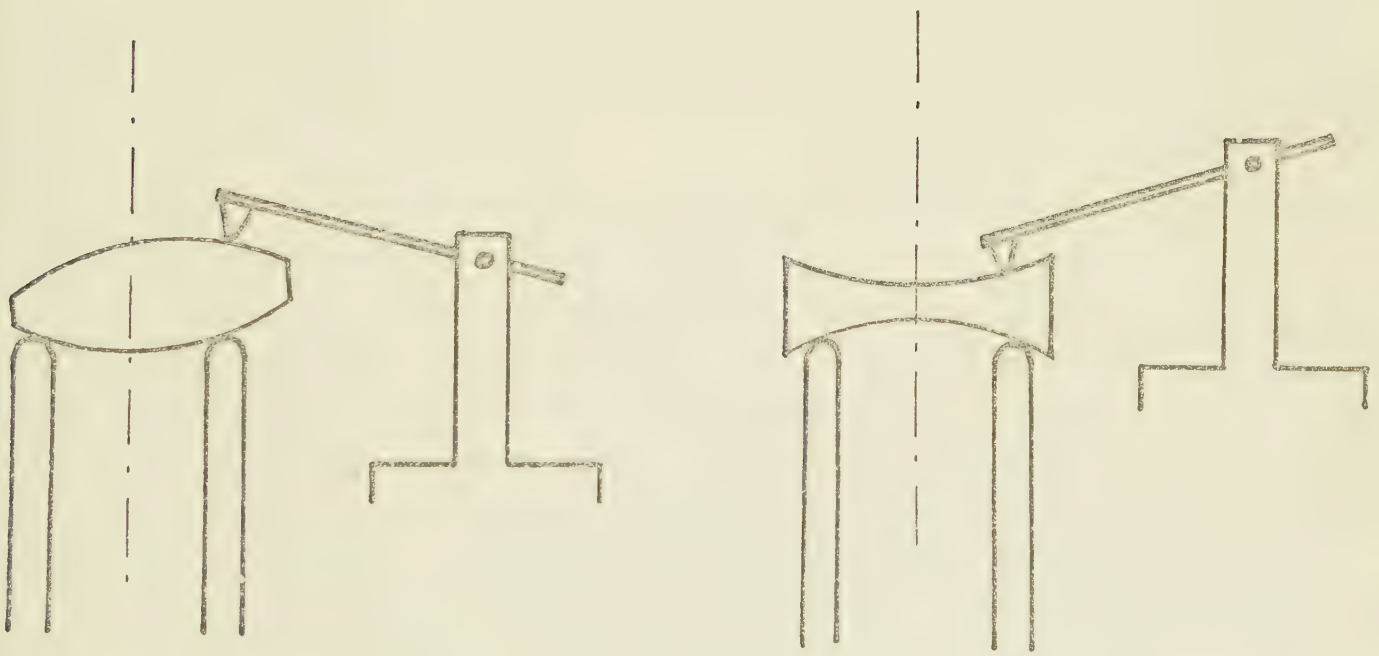


Fig. 17



a. Lentille convexe

b. Lentille concave

Fig. 18

Les réglages horizontal, vertical et en inclinaison permettent de réaliser ces conditions pour un grand nombre de lentilles (fig.18). Notre montage a été conçu pour s'adapter sur un touret vertical de centrage existant à l'I.O.T.A.

Ce réglage automatique est simple, rapide et systématique. On place la touche d'ivoire afin qu'elle travaille dans des conditions optimales. Le ciment qui fixera la lentille après réglage est rendu bien malléable par chauffage. On fait tourner la lentille, et après une dizaine de tours la surface est centrée. On continue à faire tourner la broche pendant que l'ensemble refroidit. Nous avons fait plusieurs essais très concluants. Avec une lentille biconvexe de rayons R_1 = 49 mm, R_2 = 68 mm, nous avons obtenu une précision angulaire de 6 secondes d'arc. Cependant, ce dispositif est peu efficace pour des surfaces de grand rayon de courbure. La touche risque de marquer les surfaces traitées, comme le fait le bâton d'ivoire des opticiens. Il suffit que la zone de contact soit située hors de la zone optiquement utile. Cette méthode automatique, constitue un procédé de centrage particulièrement facile à mettre en oeuvre.

3 - Méthode utilisant un listel et une fixation par aspiration.

Le maintien de la lentille par création d'un vide partiel dans la broche rend le réglage beaucoup plus simple. On peut utiliser cette solution dans deux cas :

a) cas du débordage du verre : il suffit de coller la lentille sur le listel quand le réglage est terminé.

b) cas du débordage du barillet : on peut envisager d'usiner avec précision la monture sur la broche. Cette monture doit comporter intérieurement un listel parfaitement centré sur lequel vient reposer la lentille (fig.19) Le réglage se fait comme dans le cas précédent de débordage du verre seul. En particulier on peut faire le vide dans la broche. Il suffit ensuite de coller définitivement la lentille dans son barillet. Cette méthode est vraiment intéressante car elle évite le débordage du verre, et l'ajustage verre-métal, qui est nettement plus délicat que celui de deux pièces métalliques.

.../...

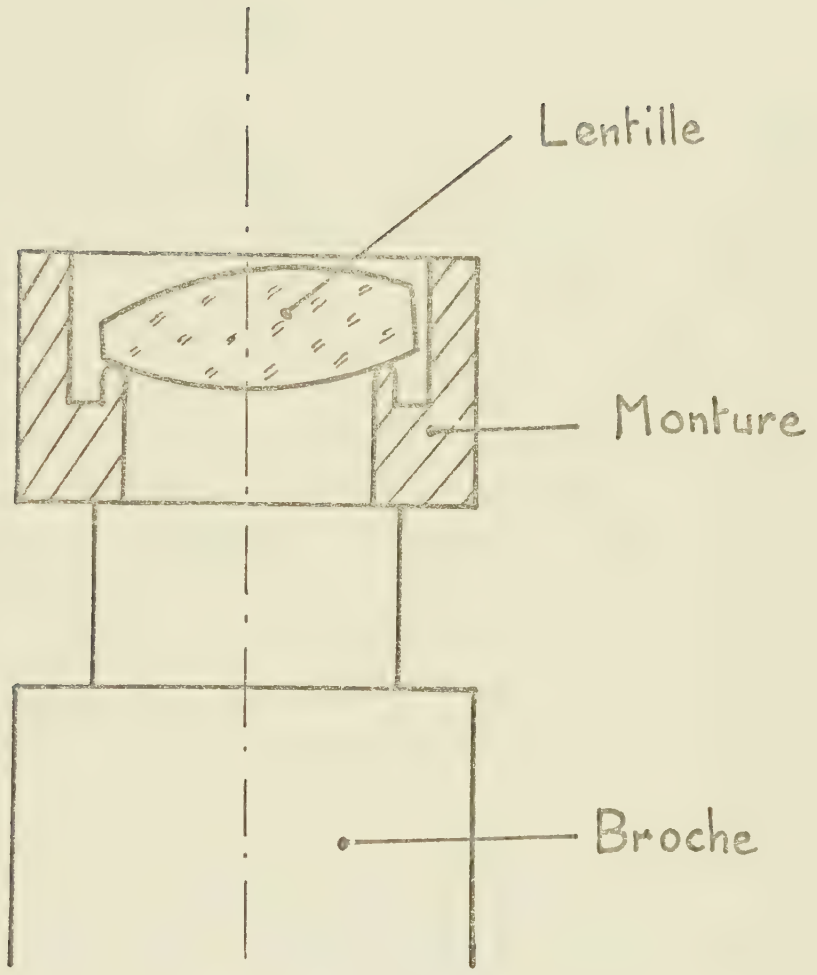


Fig. 19

4 - Méthodes n'utilisant pas de listel :

On a vu dans l'étude bibliographique des méthodes de centrage qui n'utilisent pas de listel de référence. Ces techniques ont l'avantage de supprimer le débordage très précis des verres. On peut envisager deux solutions :

a) on centre la lentille à l'aide d'un système adapté et on la colle dans sa monture pré-réglée. Nous ne reviendrons pas sur ces méthodes décrites longuement dans l'étude bibliographique [9 , 10].

b) La lentille est collée dans son barillet pré-usiné. L'ensemble est fixé sur un système mécanique pourvu de deux rotations et deux translations permettant de placer les deux centres de courbure sur l'axe de la broche. Après réglage, on usine l'extérieur de la monture avec précision.

L'usinage de la monture peut être fait sur un tour de mécanicien. Le système mécanique de réglage est placé sur la broche du tour. La difficulté principale est de figer cet ensemble dans sa position idéale et maintenir la stabilité pendant l'usinage. Pour éviter ces déréglages on peut imaginer la méthode suivante. Comme précédemment on centre la lentille collée dans sa monture sur le mandrin réglable. On repère par un système de mesure l'angle d'inclinaison de la monture et l'excentrement de son pourtour par rapport à l'axe de la broche. Le barillet est alors placé sur le plateau sinus d'une rectifieuse plane, incliné pour rattraper l'erreur angulaire. On usine les faces planes supérieure et inférieure qui seront ainsi parallèles entre elles et rigoureusement perpendiculaires à l'axe optique. De même on place le barillet sur un plateau tournant et on règle son excentrement afin de retrouver les conditions mesurées précédemment. On usine alors le cylindre extérieur. Le barillet possède donc des faces centrées et perpendiculaires à l'axe optique de la lentille.

B - Méthode retenue pour les essais

Nous avons essayé dans la mesure du possible d'adopter des solutions mécaniques et optiques qui n'excluent aucune possibilité. Nous nous sommes limités dans cette première étape à la réalisation complète d'un dispositif permettant de régler une lentille reposant sur un listel. Les autres méthodes pourront être étudiées en adaptant le système mécanique à deux rotations et deux translations sur la broche. L'étude de cet ensemble coûteux et délicat n'a pas pu être entreprise. Le système de détection optique permettant le réglage automatique de la lentille dans ces conditions a été étudié.

.../...

1 - Choix de la broche :

La broche dont l'axe de rotation sert de référence, constitue l'élément central et essentiel du système mécanique. Il faut qu'elle soit précise et fiable, et qu'elle puisse travailler sans altération de la précision soit à vitesse élevée pour l'usinage du listel ou du barillet, soit faible pour le réglage.

a) Utilisation d'un cylindre rectifié reposant sur deux V : c'est pratiquement la solution la plus simple. La rotation est en principe parfaite et ne dépend que de l'état de surface du cylindre. Mais l'entraînement pose un problème difficile et un tel dispositif ne permet pas d'atteindre des vitesses élevées. Nous avons envisagé de faire l'usinage du listel à faible vitesse en utilisant une fraise diamantée entraînée par une turbine à air comprimé. L'état de surface obtenu s'est avéré moins régulier qu'avec un outil de coupe . La précision de l'usinage est comparable et des essais complémentaires doivent être envisagés. L'étude complète d'une broche de ce type n'a pas pu être envisagée dans le cadre de cette étude, d'autant plus que des broches excellentes sont actuellement commercialisées.

b) Broches à roulements ; ces broches très classiques ont fait leurs preuves dans de nombreuses machines outils. Il est cependant difficile de trouver des broches légères, et peu encombrantes ayant une précision de rotation inférieure au micron.

c) Broches hydrodynamiques : ces broches sont actuellement très employées par la mécanique de précision. Elles utilisent des paliers à huile. Elles peuvent travailler à des vitesses de rotation élevées (plusieurs milliers de tours/mn) et avec une précision pouvent atteindre le dixième de micron. A petite vitesse, la précision est inférieure et une telle broche ne conviendrait pas pour le réglage.

d) Broches hydrostatiques : ces broches sont similaires aux précédentes. On les rencontre sur les appareils de contrôle de circularité, mais aussi sur les machines outils. Elles utilisent un palier hydrostatique à air ou à huile. Elles peuvent supporter des efforts moins grands que les broches hydrodynamiques. Par contre, elles ont l'avantage de garder une grande précision, couramment inférieure au dixième de micron, pour une gamme de vitesses allant d'une fraction de tours à quelques milliers de tours par minute. Ces broches conviendraient parfaitement pour notre problème.

Cependant, elles sont très coûteuses, lourdes et encombrantes. Leur utilisation nécessiterait qu'on construise un touret de centrage et une déborderuse autour d'elles. L'idéal serait d'adjoindre à cette nouvelle déborderuse les méthodes de détection, de fixation de la lentille et d'usinage du listel.

Nous avons finalement opté pour une broche à roulements, de prix abordable et d'encombrement réduit, ayant une précision en rotation meilleure que le micron.

2 - Fabrication du listel :

On admet que la face qui repose sur un listel est automatiquement centrée. Il faut donc que la précision d'usinage soit compatible avec la précision recherchée. Comme nous l'avons expliqué (cf. étude bibliographique), le listel est généralement une arête vive usinée au bout d'un tube. Un usinage parfait de cette arête est difficile et il reste inévitablement des imperfections. D'autre part, cette arête vive raye parfois les surfaces polies de verres denses et fragiles, et risque de marquer les surfaces traitées. Pour améliorer la précision il semblait donc souhaitable de rechercher une autre forme.

Nous avons essayé des listels en forme de tore. Une portion de tore peut être obtenue avec un outil à usiner des surfaces sphériques excentré ou avec un outil de forme. La précision de l'usinage ne dépend que de l'outil et de la broche. La qualité du contact verre métal est excellente puisqu'en principe ce contact se fait suivant un cercle.

Nous avons également imaginé une autre solution qui peut être utilisée pour de très petites séries : un listel de forme sphérique, ayant le même rayon que la surface de la lentille qu'on viendra y appliquer. L'usinage se fait par abrasion à l'aide de la balle ou du bassin utilisé par l'opticien pour faire la surface. La principale difficulté vient du centrage de cette portion de sphére sur l'axe de la broche. Cette opération peut être contrôlée au comparateur par exemple, mais demande du temps et beaucoup de doigté.

3 - Collage lentille-listel ;

Le collage doit assurer une fixation rigide pendant le débordage. Nous avons d'abord utilisé le "ciment" usuel des opticiens. C'est un mélange de cire et de poix qui a son point de fusion vers 60-70° C. Nous avons vérifié que ses propriétés mécaniques étaient satisfaisantes.

Par crainte d'une déformation ou d'un déplacement mécanique de l'ensemble listel-verre sous l'action de la chaleur, nous avons cherché une colle qui aurait les mêmes propriétés mécaniques et serait utilisée à froid ou à température peu élevée. En s'inspirant de C.DEVE[11], et en faisant varier les proportions des divers constituants, BBONINO a trouvé une colle se comportant comme le ciment précédent et ayant de plus l'avantage de fondre vers 40° C. Sa stabilité mécanique s'est révélée très satisfaisante.

4 - Description du dispositif mécanique de centrage :

Ce dispositif est monté sur un banc standard de mécanicien (fig.20). Il a été conçu pour permettre une fixation par aspiration et une détection optique d'excentrement par transmission à travers la lentille, ou par reflexion sur une de ses faces, ou par association des deux. La broche repose sur deux V . Elle est bloquée par une butée et serrage des touches caoutchouc (voir figure). Le dispositif d'entraînement peut fonctionner dans deux positions :

* Position usinage du listel : le dispositif est placé en position arrière. Le doigt solidaire des poulies entraîne le doigt solidaire de la broche. On a ainsi une transmission du mouvement de rotation sans transmission des vibrations. Les poulies sont entraînées par un moteur à vitesse variable. La broche est ainsi animée d'une vitesse allant de 90 à 1600 tours/mn.

* Position réglage : le système d'entraînement est placé en position avant et le joint de téflon est au contact de la partie arrière polie de la broche. Si on plaque la lentille sur le listel, on forme ainsi une cavité parfaitement étanche allant du listel au hublot arrière. A l'aide d'une pompe à membrane, on crée un vide propre et sec de 3 cm de mercure qui suffit pour maintenir la lentille. Pour la régler, on la pousse par la tranche à l'aide d'une vis micrométrique (fig.20). Ce dispositif d'entraînement permet de faire tourner la broche pendant le réglage tout en conservant le vide nécessaire pour le maintien de la lentille. Cette rotation peut être effectuée à la main. Nous avons également prévu un moteur auxiliaire amovible permettant de faire tourner la broche à une vitesse variant de 0 à 30 tours/mn. L'entraînement se fait par friction sur la partie arrière moletée de la broche. Cette rotation est utilisée dans le cas de débordage classique pour le collage à chaud de la lentille en fin de réglage ; il est alors nécessaire de faire tourner la lentille très régulièrement pour avoir un bourrelet de colle uniforme. Le débordage est effectué sur une débordeuse de l'I.O.T.A., que nous avons modifiée de façon à l'adapter à la nouvelle broche.

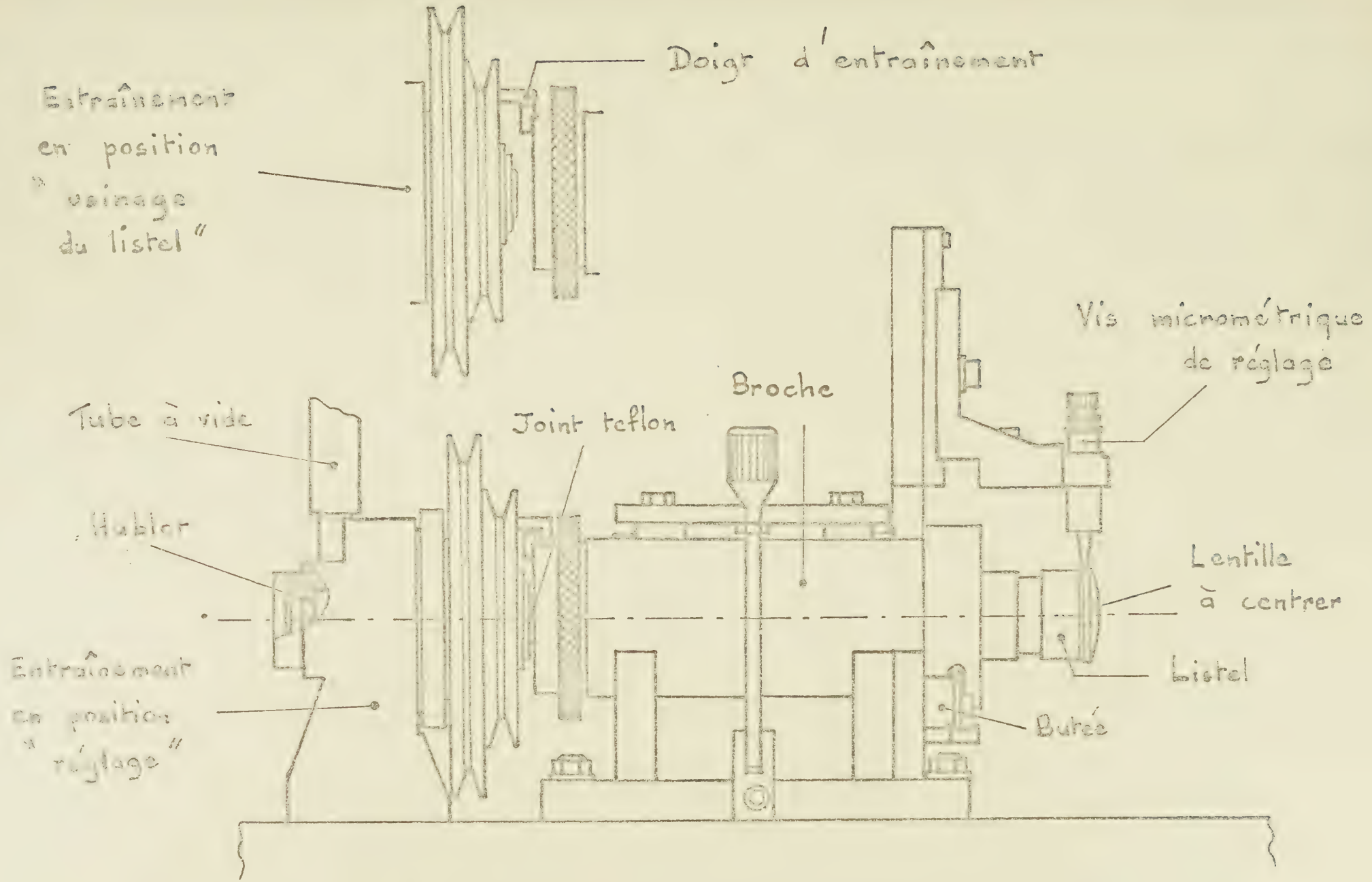


Fig. 20 : Dispositif mécanique

IV. METHODES DE DETECTION EXPERIMENTEES :

Avant d'arrêter notre choix sur une méthode de détection d'excentrement, nous avons examiné plusieurs autres dispositifs qui étaient susceptibles de résoudre le problème posé.

Pour contrôler la forme des surfaces d'une lentille, les opticiens utilisent des calibres de courbure dont la surface est parfaitement sphérique. Ces calibres se font par paire en usinant simultanément les surfaces concaves et convexes. Nous avons tout d'abord envisagé d'utiliser ces calibres en remplaçant un miroir d'un interféromètre de Michelson par la surface à centrer et l'autre par le calibre correspondant (fig.21.). Malheureusement les faisceaux réfléchis convergent (ou divergent) et l'un d'eux traverse la séparatrice. Il en résulte naturellement un astigmatisme important qui se traduit par des franges hyperboliques difficilement exploitables. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons essayé un montage du type "Twymann-Green" (fig.22). Une combinaison optique permet de faire autocollimation sur la surface à centrer en focalisant en son centre la courbure. Cette méthode est évidemment très sensible aux altérations des surfaces d'onde. L'objectif à focale variable doit donc être parfait optiquement et mécaniquement, tout en ayant une variation de convergence importante. Nous n'aurions pu réunir ces conditions qu'au prix d'une réalisation longue et coûteuse. Nous avons donc également abandonné ce montage.

Le deuxième dispositif envisagé utilise l'interférométrie différentielle. A l'aide d'un objectif à focale variable, on focalise un faisceau laser élargi au centre de courbure de la surface à centrer (fig.23). Après autocollimation sur la lentille, le faisceau est réflêchi par les faces d'une séparatrice légèrement primatique. Les deux faisceaux ainsi obtenus interfèrent dans leur partie commune et on obtient en pricipe des franges rectilignes "d'égale épaisseur". Si la lentille à contrôler est excentrée, on observe un mouvement alternatif de translation des franges. En fait, la mauvaise qualité de la surface d'onde déforme à nouveau les franges d'interférence jusqu'à les rendre inutilisables.

.../...

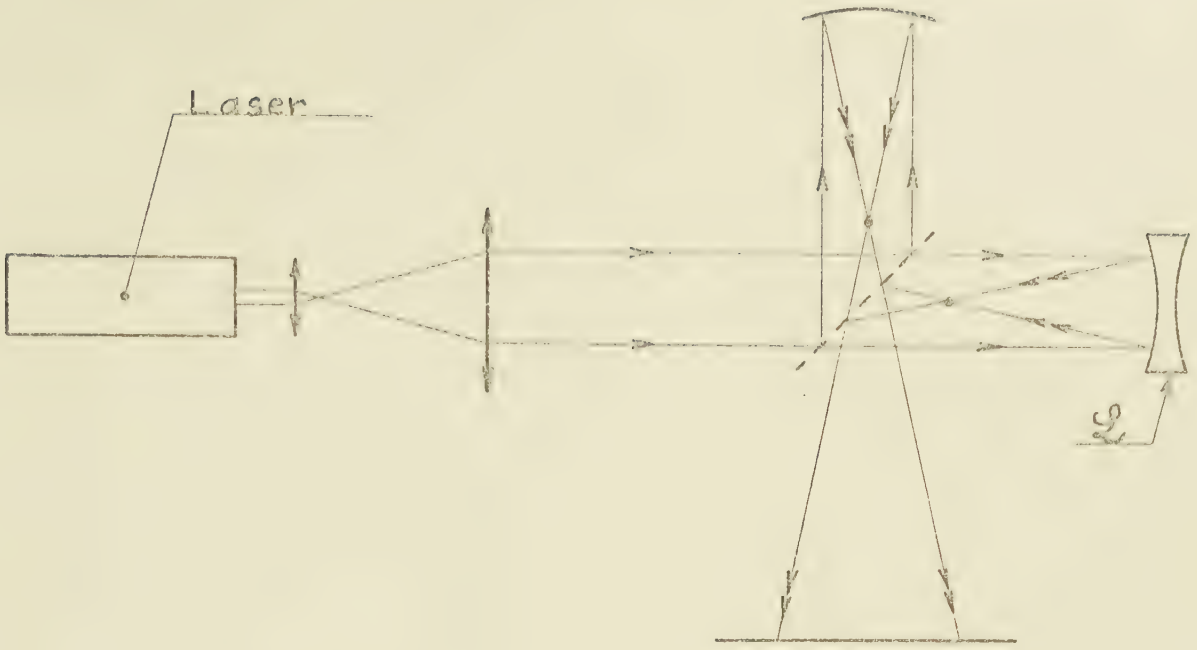


Fig. 21

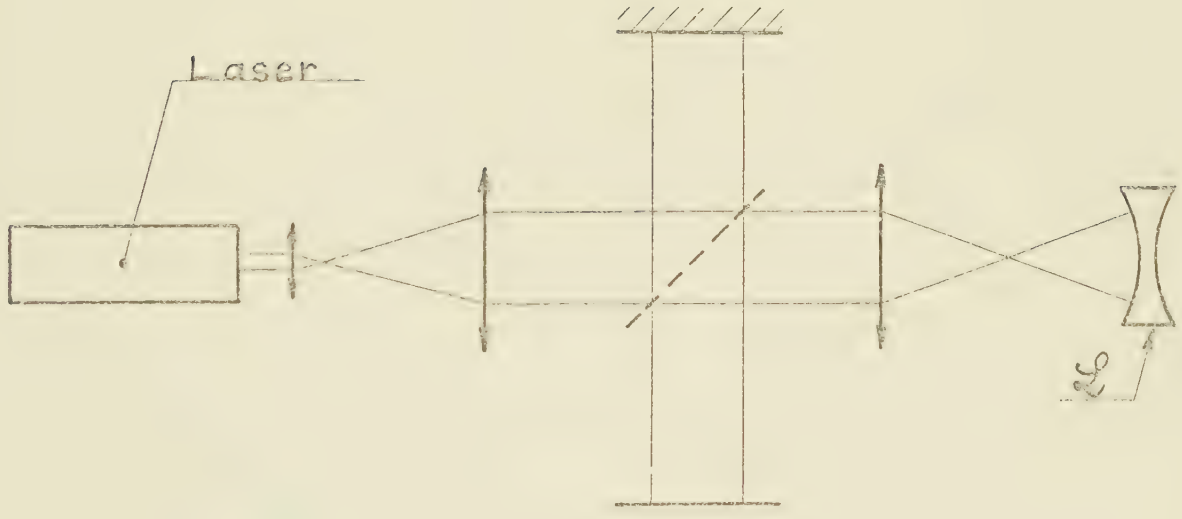


Fig. 22

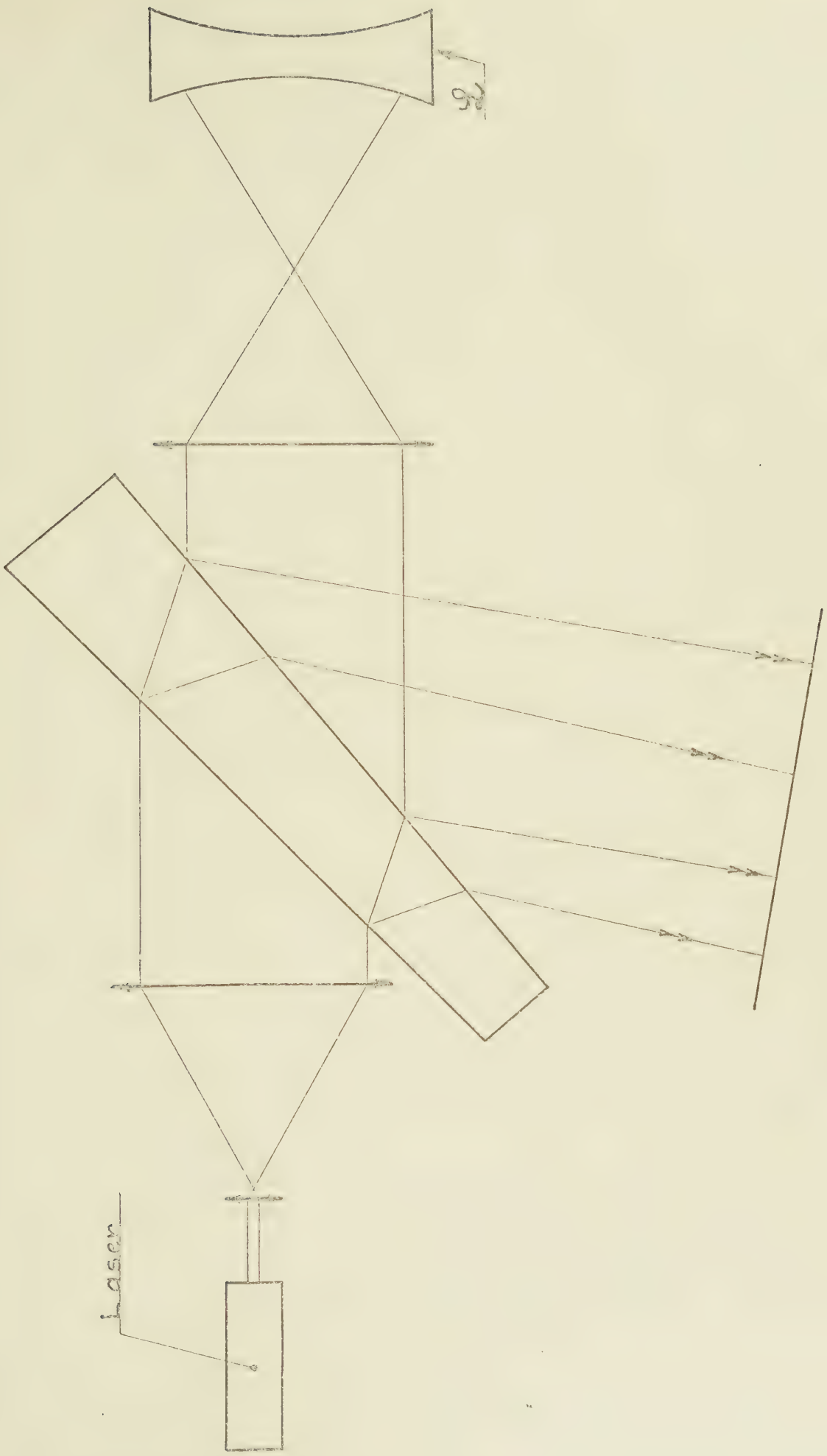


Fig. 23

L'expérience suivante reproduit le montage interférentiel décrit dans un brevet résumé dans l'étude bibliographique [10]. Un faisceau laser élargi tombe sur la lentille à centrer (fig.24). Les faisceaux réfléchis par les deux faces de la lentille sont renvoyés par une séparatrice vers un objectif et un oculaire muni d'un réticule annulaire. L'objectif conjugue la première surface de la lentille avec le réticule de l'oculaire. Les deux faisceaux réfléchis sont cohérents et interfèrent en donnant naissance à des anneaux non localisés. On observe ces anneaux d'interférence à l'aide de l'oculaire. Le diamètre des anneaux peut varier dans de grandes proportions et dépend des rayons de courbure des surfaces de la lentille.
Nous avons essayé de déterminer la sensibilité de la méthode quand on translate la lentille suivant une droite perpendiculaire à l'axe optique de la lentille, ou quand elle tourne autour de cette même droite. Avec une lentille biconvexe de rayon R = 58 mm, nous avons détecté une rotation minimum de 5 secondes d'arc. Par contre, une mauvaise position en translation est difficile à déceler : il faut un déplacement de plusieurs centièmes de mm pour observer un effet notable. Nous avons rejeté cette méthode, car même dans le meilleur des cas sa sensibilité est insuffisante.
Le montage que nous décrirons ci-dessous s'inspire de la méthode : "détermination de la normale en un point d'une surface courbe" [12] présentée par M.CAGNET dans son enseignement à l'Ecole Supérieure d'Optique.
Le faisceau issu d'un trou source T est réfléchi par une séparatrice et focalisé par un objectif sur la surface à centrer Σ (fig. 25.) Un repère A (pointe d'une épingle) est placé dans le plan focal de l'objectif. L'image T' du trou T éclaire une petite surface sur le dioptre Σ. On peut assimiler cet élément de surface avec le plan tangent en T' au dioptre Σ. Les rayons lumineux s'appuyant sur A donnent, après réflexion sur ce petit miroir plan et double traversée de l'objectif O, une image renversée A' dans le plan focal de l'objectif. La pupille de l'oeil de l'observateur est placée en T". Si le plan tangent au dioptre est perpendiculaire à l'axe du système, cet observateur voit le repère A et son image renversée A' tangents par la pointe de l'épingle.
Nous avons fait les premiers essais avec une surface de rayon R = 100 mm. La sensibilité s'est avérée assez faible : de l'ordre de plusieurs dizaine de secondes. Elle est surtout limitée par le manque de flux et la diffraction engendrée par le repère A. Nous n'avons pu améliorer ce procédé que dans de faibles proportions en reprenant l'image T" avec un viseur.

.../...

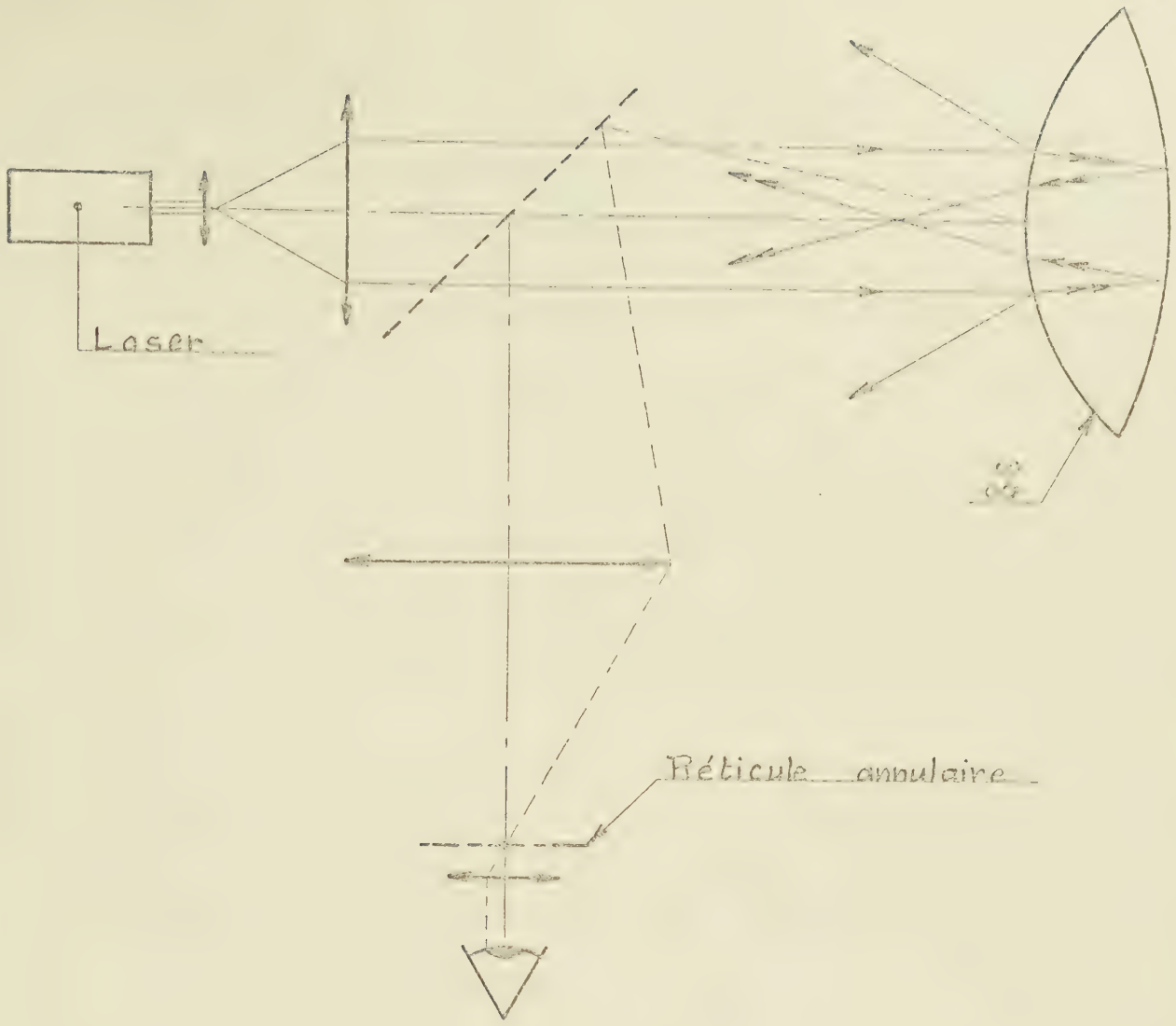


Fig. 24

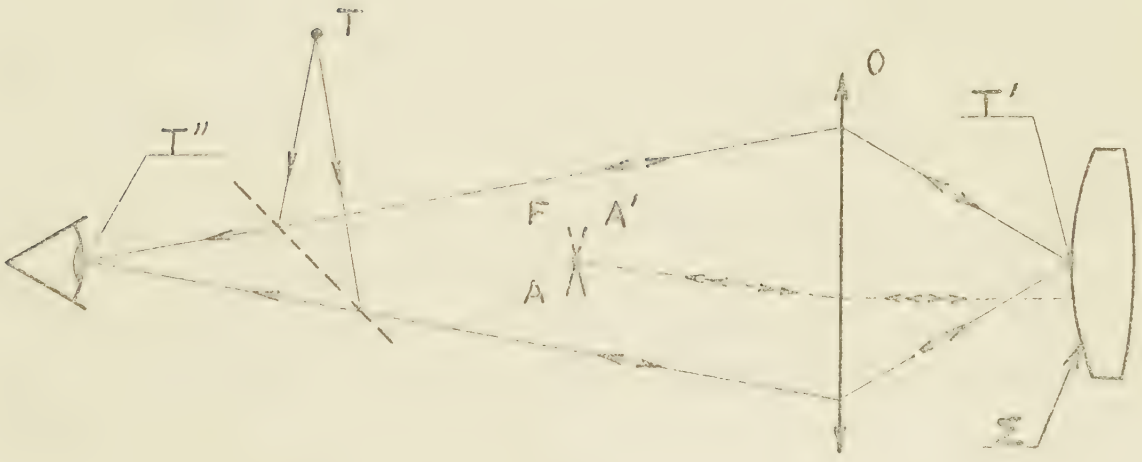


Fig. 25

Le dernier dispositif a été proposé par E. HUGHES des Etablissements CERCO. Il présente certains avantages par rapport aux systèmes précédents. Le montage initial est représenté à la figure 26. Le faisceau laser émis par un laser Hélium Néon est dédoublé par une séparatrice g. La partie réfléchie passe sensiblement par le centre de courbure C de la surface à centrer $\mathcal{L}$ et revient vers la source après réflexion sur la surface à contrôler. Ce faisceau traverse alors partiellement la séparatrice g. A la sortie du laser, le flux transmis par la séparatrice g se réfléchit sur un miroir m, qui la dirige sur le centre de courbure C. Après réflexion sur la lentille, cette deuxième partie se réfléchit successivement sur le miroir et la séparatrice et repart dans la même direction que la première. Le laser, de faible divergence, peut être assimilé à un point objet à l'infini. Après réflexion sur les miroirs g et m, les deux faisceaux qui se dirigent vers la lentille à centrer convergent aux foyers secondaires du dioptre sphérique étudié.

Après les diverses réflexions sur les miroirs plans on recueille à la sortie de l'interféromètre deux faisceaux divergents et cohérents, semblant provenir des images F_1 et F'_2 des deux foyers secondaires F_1 et F_2 (voir annexe). Nous sommes donc en présence d'un montage du type interféromètre d'Young, l'observation se faisant suivant la droite joignant les sources secondaires F'_2 et F_1. Les franges d'interférences sont des anneaux non localisés, centrés sur l'axe F'2 F_1. On peut montrer (voir annexe) que la différence de marche Δ au centre P_o du phénomène vaut $\Delta(P_o) = 2d + K\beta.R$, où d et K sont des constantes ne dépendant que de la géométrie du système, R le rayon de courbure de la face considérée, et β la projection dans le plan d'incidence de l'angle α que fait la normale au sommet de la lentille avec un axe de référence (l'axe d'une broche en général). Quand la lentille tourne, la projection β de l'angle α varie, ce qui modifie la différence de marche Δ. Si pendant la rotation Δ varie de plusieurs longueurs d'onde, on verra défiler en P_o une succession de maxima et de minima d'intensité lumineuse.

Le montage précédent présente l'inconvénient de nécessiter un réglage variable en fonction des caractéristiques du dioptre à contrôler. Si ce procédé reste simple en laboratoire, avec un personnel qualifié, il est préférable de le modifier pour avoir un montage mieux adapté aux nécessités industrielles.

.../...

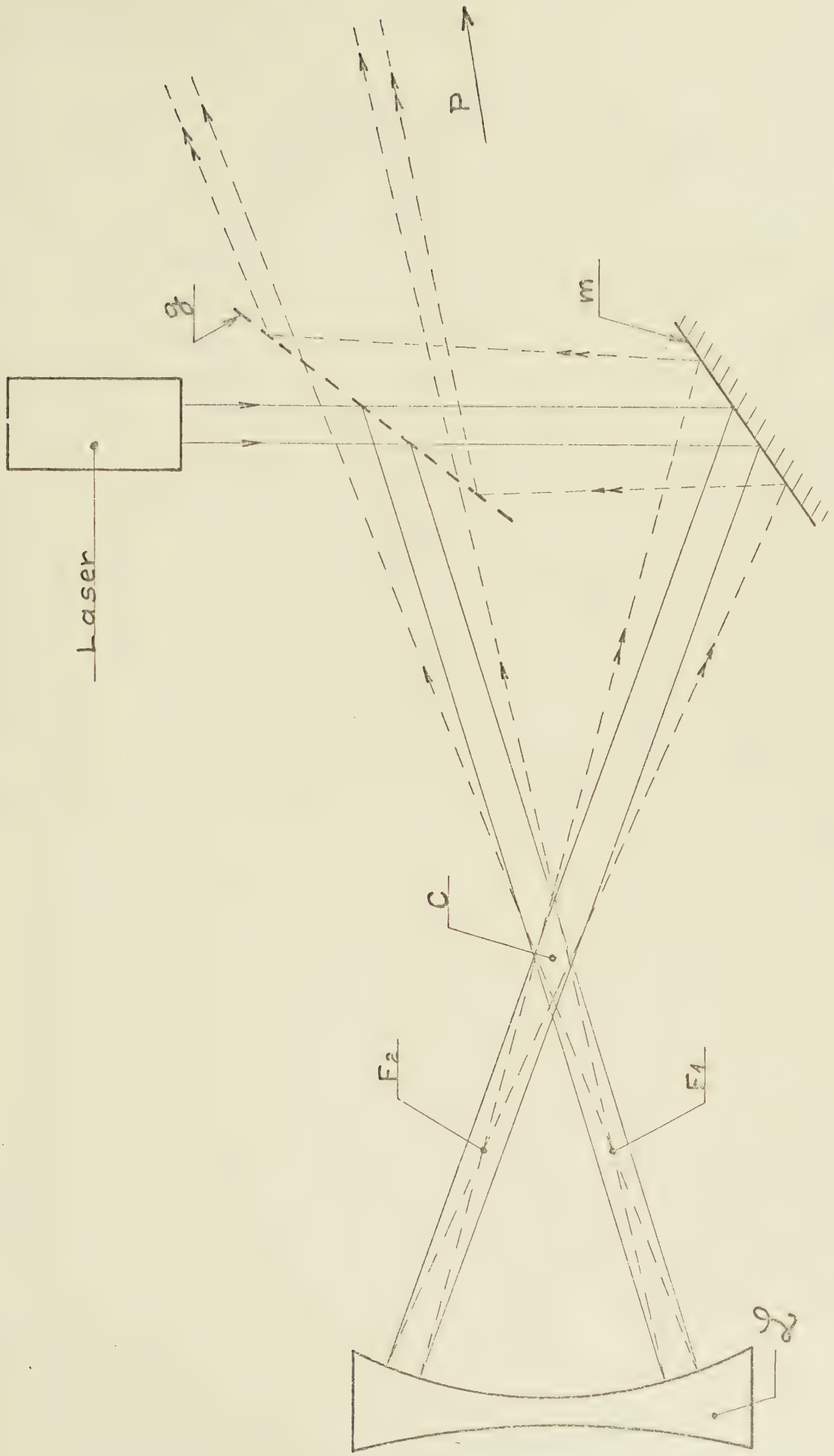


Fig. 26

Nous avons donc essayé les dispositifs représentés par les figures 27 et 28. Dans les deux cas, nous avons réglé parallèlement la séparatrice et le miroir. La convergence des deux faisceaux au centre de courbure est réalisée à l'aide d'un dispositif optique simple. Comme dans le montage précédent, après réflexion sur la lentille, le miroir et la séparatrice, les deux faisceaux émergents sont confondus et interfèrent. Pour le premier montage (fig.27), les deux surfaces d'onde étant planes et parallèles, on observe une "teinte plate". Comme précédemment, à un déplacement de la lentille correspond un défilement de maxima et de minima. Dans la dernière variante de ce dispositif, on interpose sur une des deux voies une lentille divergente de faible puissance (fig.28). Les conditions sont pratiquement les mêmes que précédemment, mais une des surfaces d'onde étant sphérique, on observe des anneaux. En modifiant la convergence de la lentille additionnelle on peut faire apparaître dans le champ un nombre déterminé d'anneaux et se fixer l'interfrange. Pour une observation visuelle, on a intérêt à utiliser un interfrange assez important pour déceler de faibles variations de différence de marche, ce qui est assez difficile avec le montage initial où les anneaux sont assez serrés.

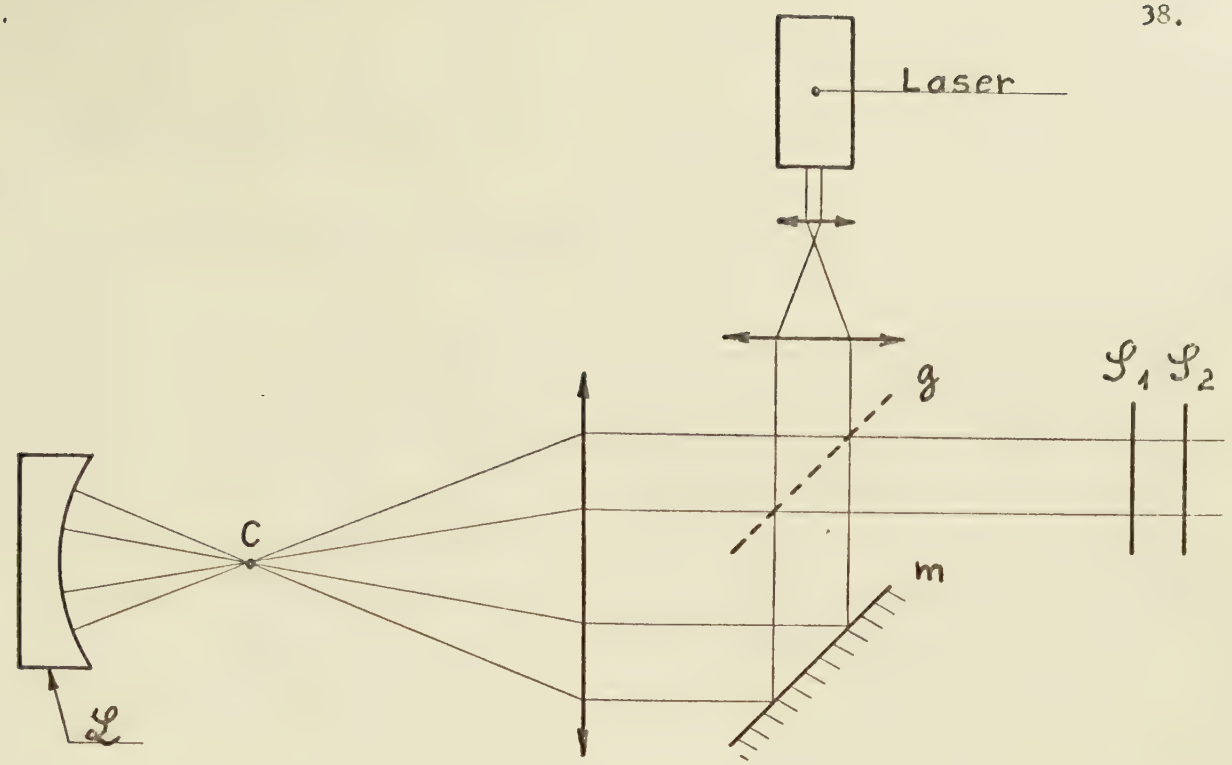

Laser
$\mathcal{S}_1$ $\mathcal{S}_2$
g
C
m
$\mathcal{L}$

Fig. 27

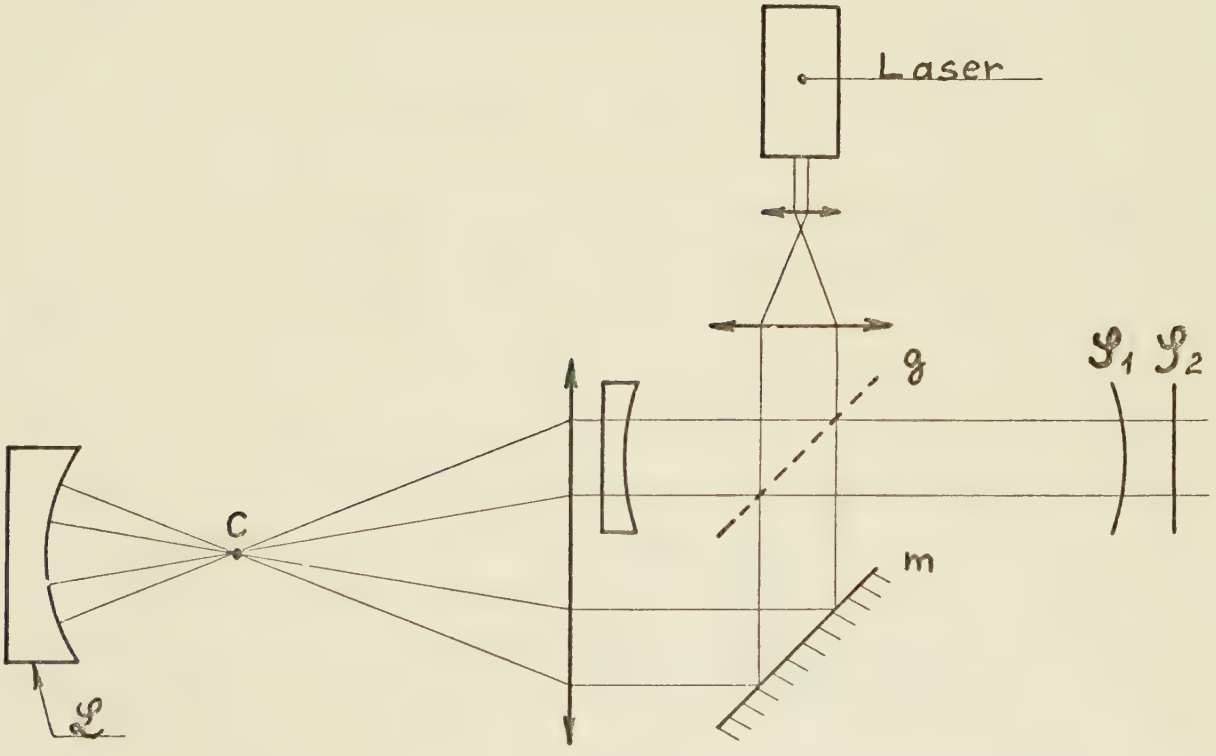

Laser
$\mathcal{S}_1$ $\mathcal{S}_2$
g
C
m
$\mathcal{L}$

Fig. 28

V. METHODES DE DETECTION RETENUES :

A - Détection interférométrique :

Ce système de détection utilise le dernier dispositif interférométrique décrit dans le paragraphe "Méthodes expérimentées". Les essais précédents ont permis d'apprécier certains avantages et la simplicité de mise en oeuvre du dispositif. Ces essais ont été satisfaisants mais ne nous ont pas permis de conclure de façon décisive par manque de stabilité mécanique. C'est pourquoi nous avons entrepris la réalisation d'un montage compact et mécaniquement stable, que l'on puisse associer à l'ensemble mécanique de réglage déjà décrit.

1 - Choix du type d'interféromètre :

Parmi les trois variantes possibles de cet interféromètre, nous avons retenu la configuration initiale. Les performances sont équivalentes pour les trois montages. Contrairement à ce que nous pensions tout d'abord, c'est le premier dispositif qui permet le plus simplement de faire varier la position des faisceaux en fonction de la position du centre de courbure. Les deux autres montages nécessitent un objectif à focale variable de très bonne qualité, ce qui entraînerait une réalisation longue et onéreuse.

2 - Mesure visuelle - possibilités et limitations :

La mesure se fait en observant l'évolution d'anneaux d'interférence. Considérons la formule qui donne la différence de marche au centre du système d'anneaux (voir annexe).

$$\Delta = 2d + 2\beta R (\sin a + \sin b) = 2d + \Delta'$$

où Δ' est la partie variable de Δ qui contient l'information intéressante. Reportons-nous à la figure 29 . Nous appelons encombrement $\mathcal{E}$ la distance que parcourt le faisceau laser entre la séparatrice g ou le miroir m et le sommet de la surface à centrer $\mathcal{L}$, et base $\mathcal{B}$ la distance parcourue par ce même faisceau entre la séparatrice et le miroir. Avec les dimensions que nous avons choisies (encombrement $\mathcal{E} \gg$ base $\mathcal{B}$), nous pouvons écrire :

$\sin a \sim \text{tg}a$

$\sin b \sim \text{tg}b$

d'où $\sin a + \sin b \simeq \dfrac{\mathcal{B}}{\mathcal{E} - R}$ d'après la figure 29 .

.../...

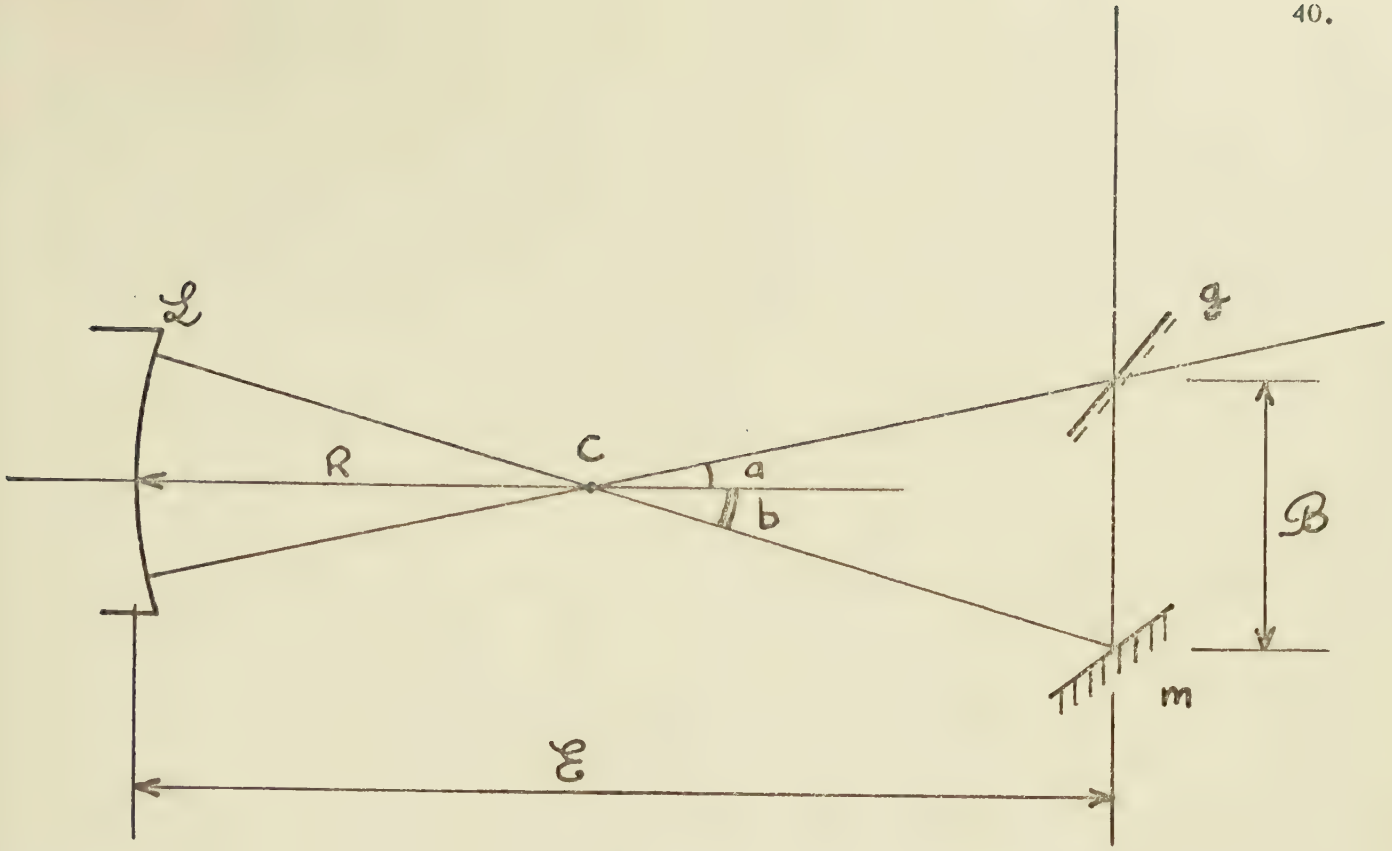


Fig. 29

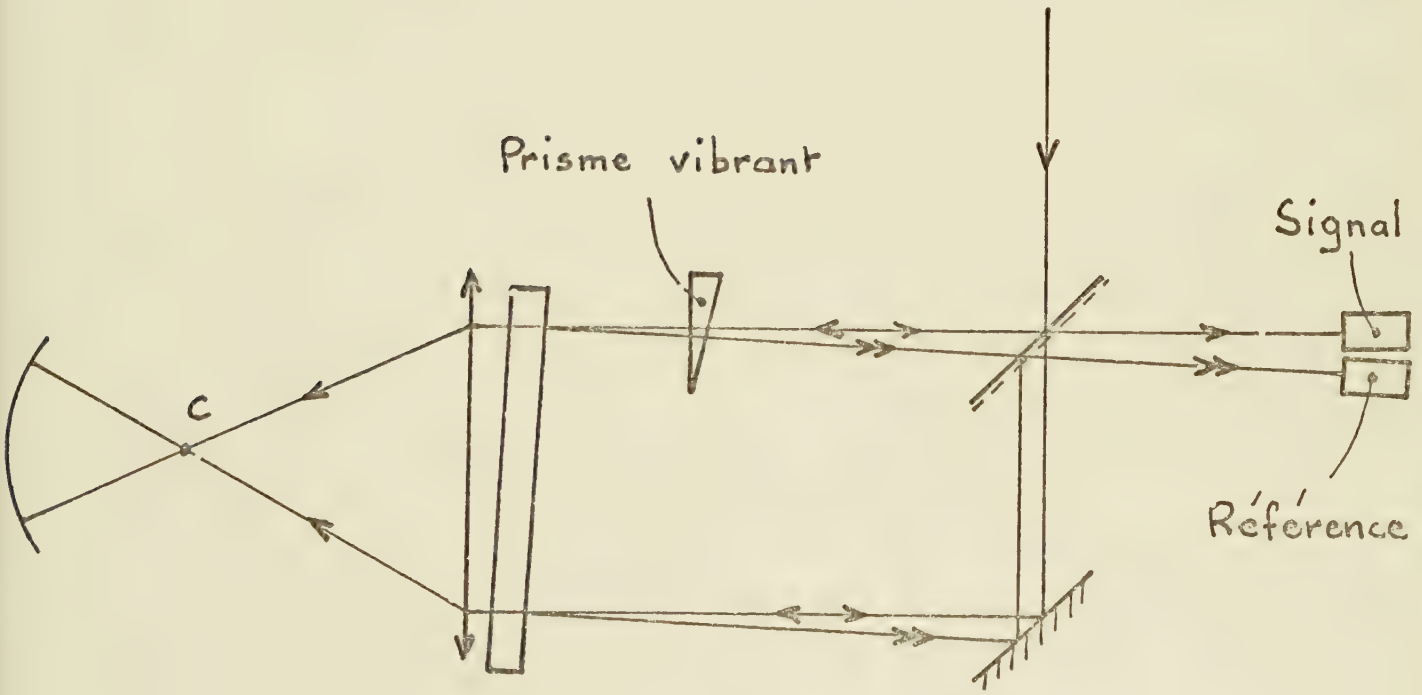


Fig. 30

On peut facilement vérifier que la valeur de Δ' calculée dans le cas particulier de l'annexe I, est toujours valable (verres concaves et convexes, R inférieur ou supérieur à $\mathcal{E}$). L'expression simplifiée peut alors s'écrire de façon générale :

$$\Delta' = 2\beta R \frac{\mathcal{B}}{|\mathcal{E} \pm R|}$$

avec le signe + si la surface est convexe

et - si la surface est concave.

Les essais déjà faits et quelques considérations mécaniques élémentaires nous ont amené à choisir :

- une base $\mathcal{B}$ pouvant varier entre 5 et 50 mm
- un encombrement $\mathcal{E}$ pouvant varier de 200 à 400 mm.

Les plages de variation de $\mathcal{B}$ et $\mathcal{E}$ étant ainsi fixées, M.MULLOT , technicien qui a participé à ces études, a établi des abaques qui permettent, pour une précision donnée (10 secondes d'arc par exemple) :

- de déterminer la tolérance en nombre de franges permettant d'atteindre la précision recherchée.
- de déduire les valeurs de $\mathcal{B}$ et $\mathcal{E}$ possibles connaissant le rayon de courbure et le diamètre de la surface à centrer.
  On peut ainsi déterminer si la mesure est possible et dans quelles conditions.

A la lecture de ces abaques, on constate qu'un certain nombre de lentilles ne pourront être centrées avec ce dispositif. Les lentilles de petit diamètre sont d'une manière générale exclues du champ d'action de ce montage. Et pour des rayons de courbure voisins de 300 mm, il faut des verres de diamètre supérieur à 35 mm pour que le réglage devienne possible. Ces restrictions sont uniquement dues aux caractéristiques géométriques du montage. Mais il est pratiquement impossible de trouver une combinaison $\mathcal{B}$-$\mathcal{E}$ permettant une gamme plus étendue.

Un listel est indispensable pour centrer une lentille avec un tel dispositif. A partir de la différence de marche, on ne peut connaître la valeur de l'excentrement que pour une seule face. De plus, dans une position donnée, on n'accède qu'à la projection β de l'angle α dans le "plan de l'interféromètre" (cf. annexe). Il faut faire tourner la broche pour obtenir une information supplémentaire : Δ' est maximum en valeur absolue quand le centre de courbure C est dans le "plan de l'interféromètre."

.../...

L'opérateur sait alors qu'il doit agir dans ce plan là. Suivant que les anneaux rentrent ou sortent, l'observateur peut en déduire le sens de l'action nécessaire sur la lentille.

En conclusion, ce montage a des possibilités limitées. Mais dans son domaine d'utilisation il est compétitif parce que simple et peu coûteux.

3 - Mesure photoélectrique :

On peut envisager de mesurer la différence de marche Δ' par un procédé photoélectrique. Pour connaître le sens de variation de Δ' il est nécessaire de moduler le chemin optique sur l'un des faisceaux : on peut par exemple y faire vibrer un prisme de verre. Il faut aussi prélever une référence de phase permettant de s'affranchir d'éventuelles variations de la différence de marche dues à des causes extérieures. Dans le montage avec un objectif à focale variable (fig. 30) une solution simple consiste à utiliser les réflexions sur une lame plane interposée dans les deux faisceaux. Dans la configuration que nous avons choisie (fig. 29) nous n'avons pas pu constituer cette référence simplement. En supposant ce problème résolu, on pourrait envisager le traitement du signal suivant :

- un comptage-décomptage des franges permettant de suivre grossièrement l'évolution du phénomène d'interférences au début du réglage. Cette méthode est utilisée par d'autres laboratoires, mais à l'aide d'un système opto-électronique assez complexe.
- un asservissement de la phase du signal pour mesurer la différence de marche Δ' avec précision. Pour compenser les variations de Δ', on peut translater un prisme de verre dans un des faisceaux, à l'aide d'un moteur pas à pas par exemple. Une étude similaire a déjà été faite avec succès à l'Institut d'Optique par J.SABATER pour un spectromètre interférentiel. Cette étude s'est également avérée longue et compliquée.

Notre but était en développant cette méthode interférométrique, de fournir un dispositif de réglage simple, puisque le nombre à priori insuffisant d'informations ne permet pas de traiter le centrage de façon générale. La complexité et l'importance de l'étude imposée par le traitement électronique du signal nous a fait abandonner ce projet.

4 - Description du montage réalisé :

Le montage définitif est représenté à la figure 31. Le faisceau d'un laser,

éventuellement élargi par un afocal, est renvoyé sur l'ensemble "séparatrice g - miroir m" à l'aide d'un miroir orientable $\mathcal{M}$.

Nous avons choisi de confondre le faisceau réflêchi par la séparatrice g avec l'axe de la broche. Ceci permet de garder la séparatrice fixe quel que soit le rayon de courbure de la surface à centrer, ce qui est précieux pour la stabilité de l'interféromètre. Par contre, des réglages sont nécessaires sur le miroir m :

- une translation perpendiculairement à l'axe de la broche pour faire varier la base $\mathcal{B}$ de 5 à 50 mm.
- une rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la figure pour que le rayon moyen du faisceau réfléchi par m passe par le centre de courbure C.

Nous avons également prévu une série de lentilles additionnelles permettant de faire varier la convergence du faisceau sur la voie miroir, et de modifier ainsi à notre gré le diamètre des anneaux.

L'ensemble des éléments m, g, $\mathcal{M}$, ℓ est fixé sur une même platine qui peut se translater suivant l'axe de la broche et permet ainsi de faire varier l'encombrement de 200 à 400 mm.

L'observation visuelle peut se faire de plusieurs façons. Dans un premier temps, nous observions les anneaux par réflexion sur un écran diffusant. Le champ étant limité, nous avons préféré utiliser par la suite une caméra électronique, et observer le phénomène agrandi sur un écran de télévision de 25 cm. Dernièrement, nous avons à nouveau modifié les conditions d'observation et projeté le système d'anneaux sur un écran diffusant par transmission.

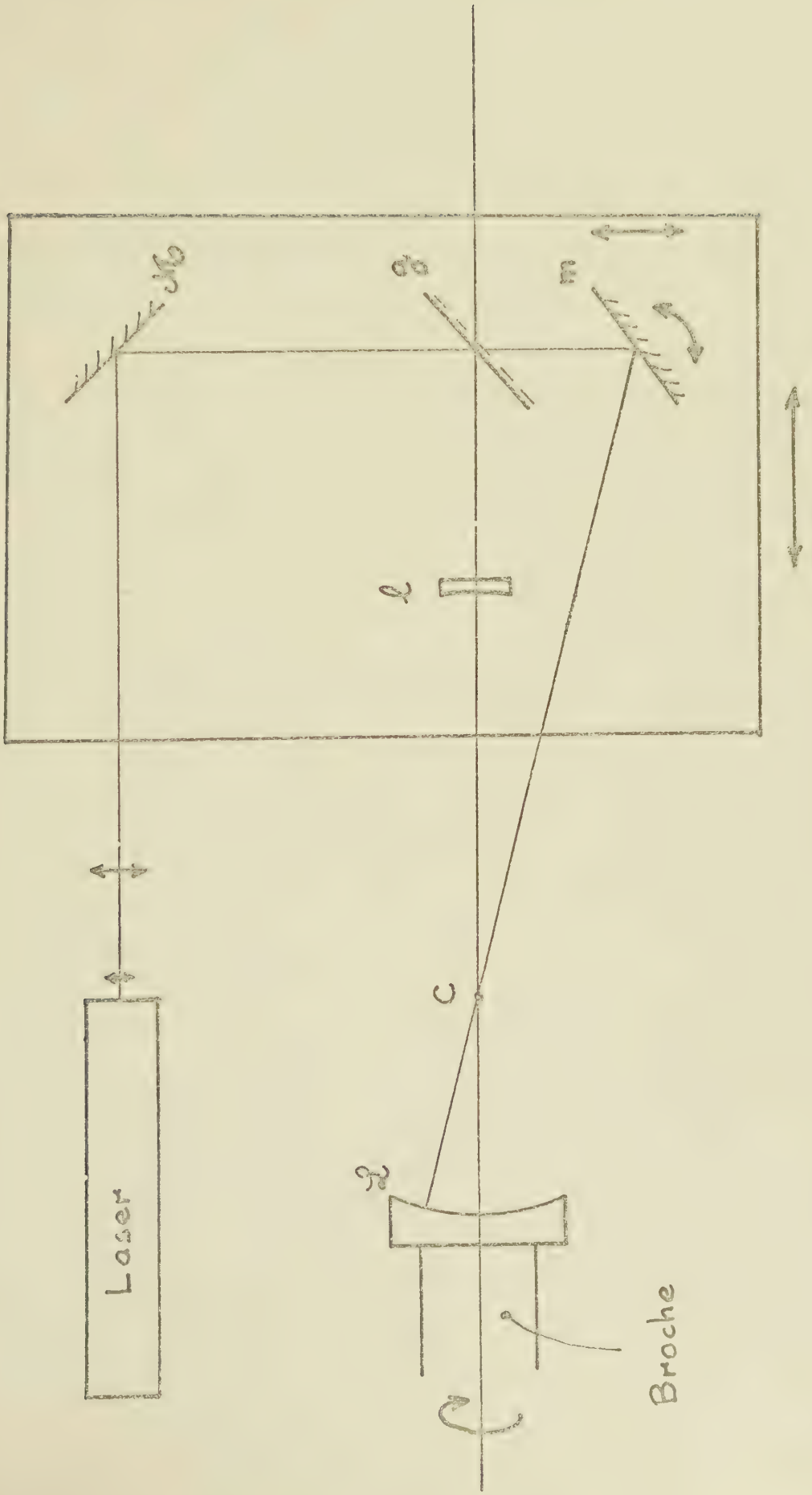
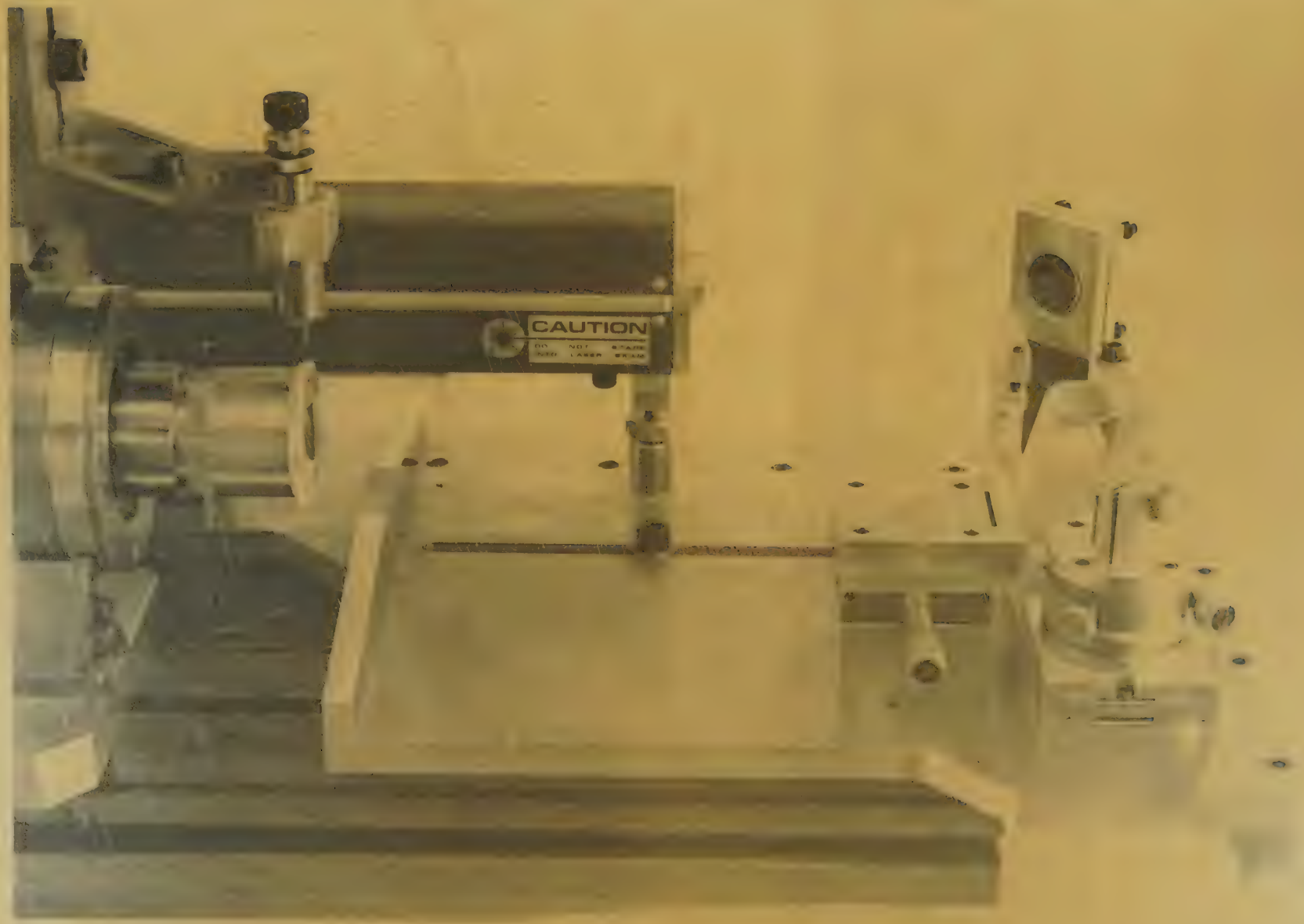


Fig. 31



Vue d'ensemble de l'interféromètre

5 - Sensibilité expérimentale :

Le montage proposé est stable puisque les anneaux sont visibles en permanence, et peu sensibles à l'environnement mécanique. Par contre, les phénomènes optiques parasites sont nombreux, si on ne les élimine pas. En particulier, la diffusion parasite due aux surfaces et deux phénomènes d'interférences se superposent et perturbent l'information.

Le premier provient des interférences entre les faisceaux réfléchis par les faces avant et arrière de la lentille. Ces anneaux, que nous avons déjà décrits sont parfois aussi contrastés que les anneaux qui nous intéressent. Des appareils de centrage des lentilles utilisent d'ailleurs ce phénomène mais nous avons vu que la sensibilité est médiocre. On peut les atténuer et même les supprimer dans certains cas en vernissant la face arrière. Bien sûr, on ne peut plus alors contrôler cette deuxième face, ce qui limite ce procédé de contrôle aux méthodes utilisant un listel.

Le second phénomène d'interférence parasite est dû aux franges d'Young rectilignes, qui apparaissent dans le cas d'une petite base (inférieure à 10 mm), ou d'un petit rayon de courbure. En effet, après réflexion sur la lentille à centrer $\mathcal{L}$, les faisceaux semblent provenir des foyers secondaires F_1 et F_2 du dioptre (voir annexe). Une partie du faisceau provenant de F_2 se réfléchit sur le miroir m, puis sur la séparatrice g et donne les anneaux utilisés avec le faisceau provenant de F_1. Du fait des petites dimensions de m, une partie du faisceau issu de F_1 n'est pas réfléchie et vient directement sur l'écran. Si la base $\mathcal{B}$ est petite, les faisceaux provenant directement de F_1 et de F_2 ont une partie commune où on observe des franges d'Young classiques. Dans le cas des lentilles de petit rayon de courbure, la divergence des faisceaux est telle qu'on observe des franges quelle que soit la valeur de $\mathcal{B}$. Un filtrage géométrique s'est avéré quasi-impossible à cause de la proximité de F_1 et F_2.
Nous avons alors cherché à filtrer par polarisation. Le faisceau laser a une polarisation rectiligne verticale. Si l'on superpose entre le miroir m et la lentille une lame demi-onde dont les lignes neutres sont à 45° de la verticale on peut supprimer ces franges. En effet, le faisceau réfléchi par m et tombant sur la lentille a alors une polarisation rectiligne horizontale. La partie du faisceau provenant directement de F_2 ne peut donc interférer avec le faisceau issu de F_1 et les franges disparaissent. Par contre, le faisceau issu de F_2 qui se réfléchit à nouveau sur m, retraverse la lame demi-onde et on obtient à nouveau une polarisation rectiligne verticale.

Les interférences sont possibles et on observe les anneaux désirés.

Avec un phénomène bien épuré, nous avons pu déterminer la sensibilité du montage. Nous avons constaté que la dimension des anneaux reste à peu près toujours la même. Ainsi, dans presque tous les cas, la variation minimum détectable est de l'ordre d'une demi-frange. Il en résulte les sensibilités suivantes avec une base de 50 mm, donc dans les meilleurs conditions :

- 1 seconde d'arc pour des lentilles de rayon de courbure R = 50 mm, ce qui est excellent.
- 5 secondes d'arc pour des lentilles de rayon de courbure R = 10 mm, quand l'observation est possible.

Dans ce dernier cas en effet, le contraste des anneaux parasites et la diffusion sont tels que, même avec une face arrière vernie, l'observation est très difficile, souvent impossible. Nous confirmons ainsi que les petites lentilles sortent généralement du champ d'action de cet interféromètre, qu'elles soient éliminées par des facteurs d'ordre géométrique ou interférométrique.

.../...

B. Méthode de détection photoélectrique :

1. Principe et possibilités d'utilisation :

La pièce maîtresse de la méthode de détection photoélectrique est un appareil de centrage par transmission qui utilise la déviation d'un faisceau lumineux traversant la lentille à centrer. Suivant la précision requise et le procédé de centrage envisagé, on peut utiliser cet appareil :

* seul
* avec un comparateur de précision
* avec un appareil de détection photoélectrique du même type, mais opérant par réflexion sur les faces de la lentille.

a - Méthode de détection par transmission :

L'utilisation de cet appareil seul suppose l'existence d'un listel. En effet, cette méthode ne permet de mesurer que la déviation du faisceau transmis et de ne régler qu'une face de la lentille, l'autre étant supposée déjà centrée. Cet appareil est donc très utile pour le centrage-débordage classique. Il permet de résoudre les problèmes des réglages allant de la précision modeste à la très grande précision. Avec la plus grande sensibilité on peut détecter un excentrement angulaire de 1 seconde d'arc.

* Principe :

Le principe de la méthode est schématisé à la figure32 . L'image T' du trou source T est formée dans la lentille à contrôler. Le faisceau émergent tombe ensuite sur un détecteur à quatre quadrants.

Un excentrement de la lentille se traduit par un déplacement du faisceau sur le détecteur, déplacement lié de façon simple à l'excentrement. Définissons les paramètres qui nous serviront à évaluer l'excentrement d'une lentille. On peut utiliser les coordonnées cartésiennes x_i, y_i $(i = 1,2)$ ou polaires ρ_i, φ_i du centre de courbure C_i de la face i par rapport à un axe zz'(cf. étude bibliographique). Dans le cas le plus courant, cet axe est celui de la broche qui supporte la lentille. Il sera très intéressant de connaître l'azimut φ_i et à un facteur près, le rayon polaire ρ_i du centre de courbure, pour savoir où et de combien il faut agir pour le réglage. Pour chiffrer l'excentrement, il nous suffira de connaître la distance $\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$, $(i = 1,2)$ du centre de courbure C_i à l'axe zz'. On peut remplacer ρ_i par l'angle $\alpha_i = \frac{\rho_i}{R_i}$ comme il est indiqué sur la figure 33 .

.../...

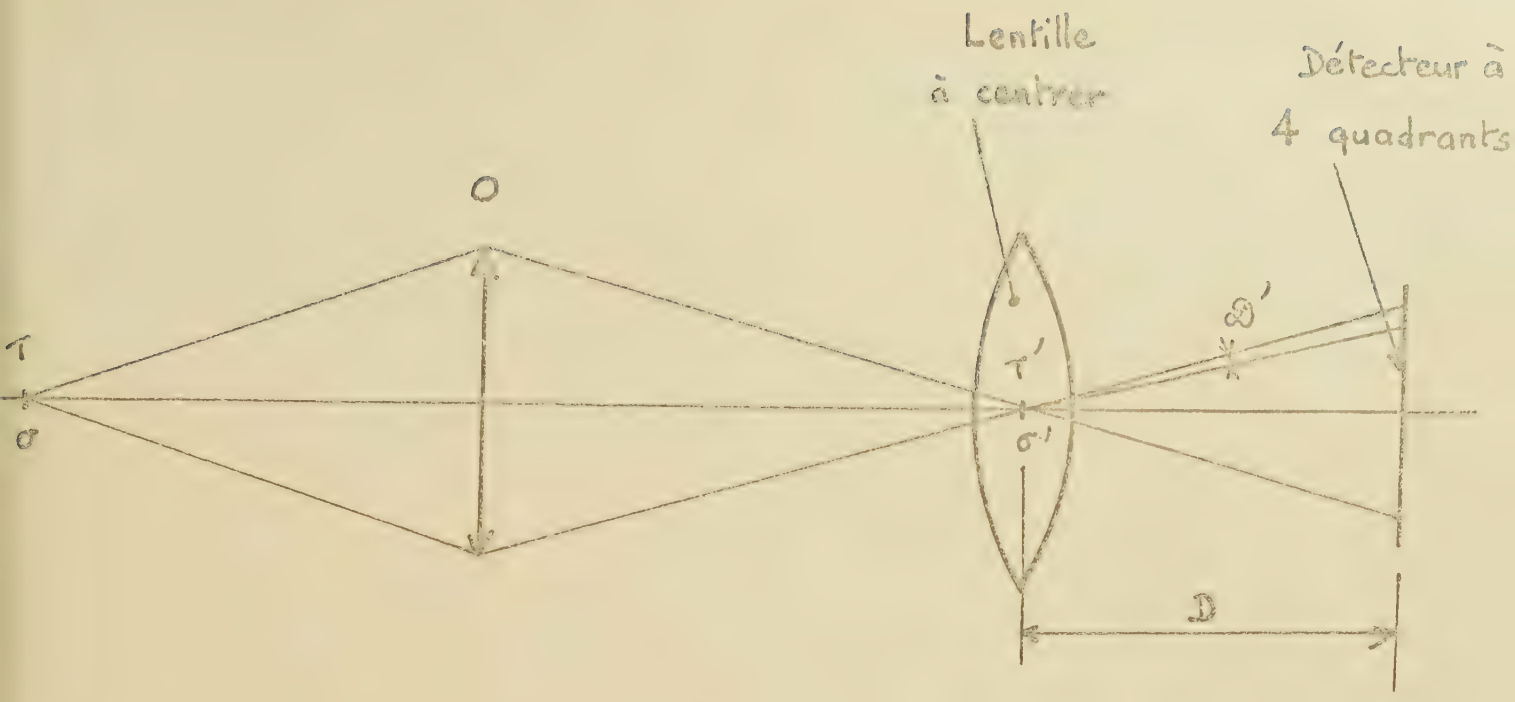


Fig. 32 : Principe de la méthode de détection photoélectrique par transmission

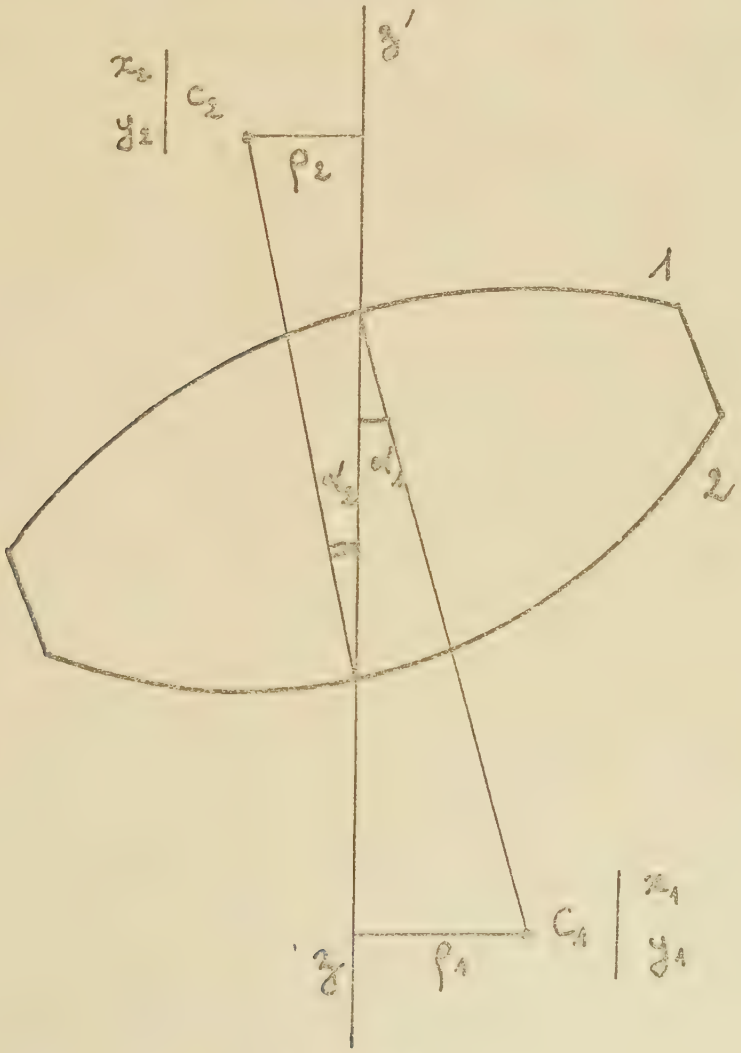


Fig. 33

Dans tous nos raisonnements, nous caractériserons l'excentrement par l'angle α_i qui est également l'angle d'inclinaison de la surface Σ_i par rapport à sa position idéale.

Considérons un rayon quelconque incident sur la face 2 de la lentille (fig.34a). Les faces sont numérotées 1 et 2 comme l'indique la figure 34a. L'opérateur les voit obligatoirement dans cet ordre puisque l'ensemble mécanique supportant la lentille est situé du côté de la face 2. Si l'on suppose que l'angle d'incidence est petit, on peut écrire que la déviation $\mathcal{D}$ du rayon vaut :

$$\mathcal{D} = (n-1)\mathcal{A}$$

en assimilant l'action de la lentille à celle d'un prisme de petit angle. $\mathcal{A}$ est l'angle des tangentes aux points I_1 et I_2, ou ce qui revient au même, l'angle des normales en ces mêmes points. Nous appellerons δ_i l'angle de la normale à la surface Σ_i en I_i avec l'axe zz' (voir figure34a). L'angle des normales vaut $\delta_2 - \delta_1$ et on peut écrire :

$$\mathcal{D} = (n-1)(\delta_2 - \delta_1) \qquad (5.1)$$

Plaçons-nous maintenant dans le cas d'une lentille reposant sur un listel. Le centre C_2 est en principe sur l'axe zz'. Si la lentille est bien centrée C_1 est aussi sur l'axe zz'. Les angles δ_i ont une certaine valeur $(\delta_i)_0$ (fig.34b) et la déviation vaut $\mathcal{D}_0 = (n-1)\left[(\delta_2)_0 - (\delta_1)_0\right]$. Si la surface Σ_1 n'est pas bien réglée, mais inclinée de α_1, δ_1 devient $\delta_1 = (\delta_1)_0 + \alpha_1$ et la déviation vaut alors :

$$\mathcal{D} = (n-1)\left[(\delta_2)_0 - (\delta_1)_0 - \alpha_1\right] = \mathcal{D}_0 - (n-1)\alpha_1$$

$$= \mathcal{D}_0 - \Delta\mathcal{D}$$

L'excentrement α_1 de la surface n° 1 se traduit donc par une variation de déviation $\Delta\mathcal{D} = (n-1)\alpha_1$.

Dans le cas d'une focalisation quelconque, $\Delta\mathcal{D} = (n-1)\alpha_1$ quel que soit le rayon, mais $\mathcal{D}_0$ varie suivant le rayon considéré. L'ouverture du faisceau émergent est indéterminée et varie suivant la focalisation et le type de lentille à régler. Dans le cas particulier où on focalise au centre optique de la lentille, en première approximation, la déviation $\mathcal{D}_0$ est nulle pour tous les rayons.

.../...

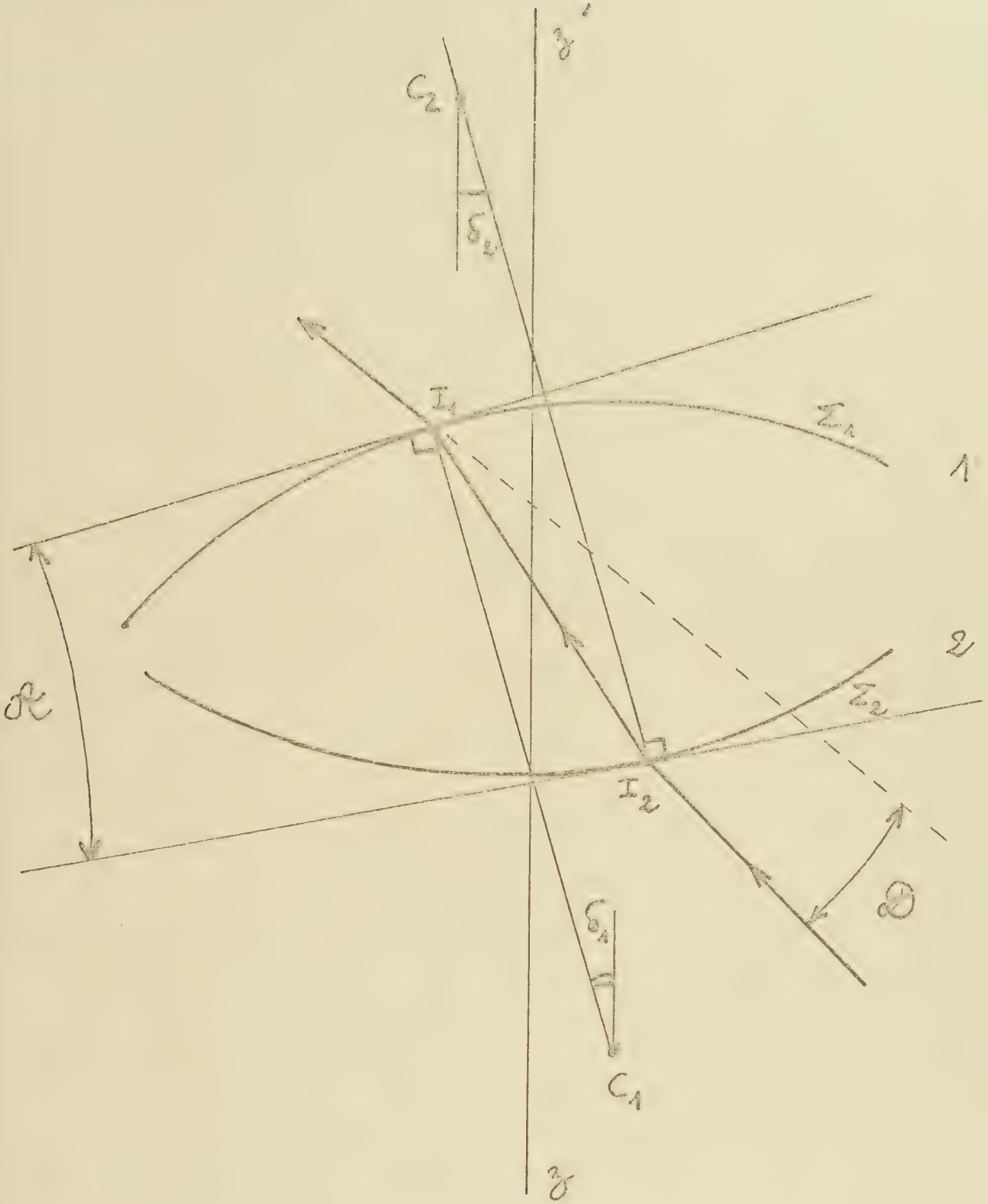


Fig. 34 a

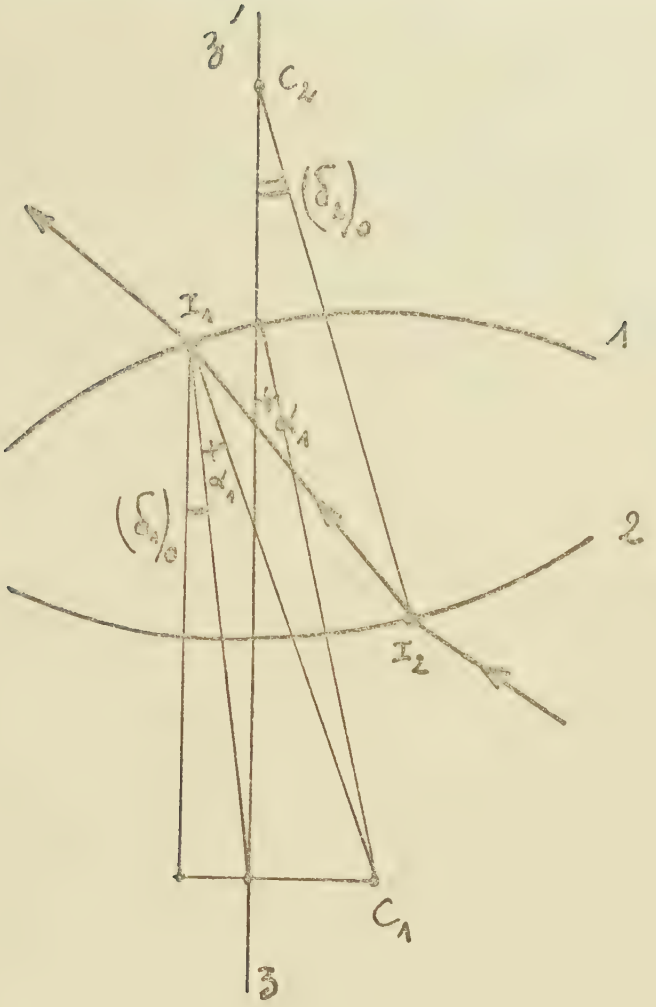


Fig. 34 b

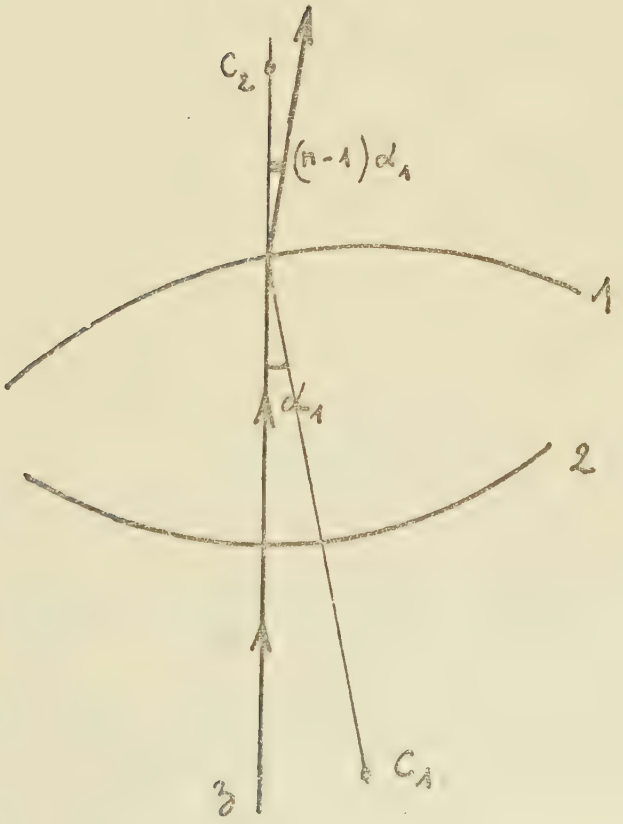


Fig. 34 c

Cette focalisation présente l'avantage :

- de fournir un faisceau émergent d'ouverture connue et égale à celle du faisceau incident.

- de s'affranchir de la variation de la déviation $\mathcal{D}_0$ en fonction de l'angle d'incidence. Dans ces conditions on a pour une inclinaison α_1 et pour chaque rayon $\mathcal{D} = \Delta\mathcal{D}$, soit :

$$\mathcal{D} = (n - 1)\,\alpha_1 \qquad (5.2.)$$

On peut alors raisonner sur un rayon particulier, par exemple le rayon moyen du faisceau incident confondu avec l'axe du système de détection (fig.34c).

* Description et fonctionnement du détecteur à quatre quadrants :

Les signaux électriques issus du détecteur sont directement reliés à la position du faisceau comme nous allons l'expliquer maintenant. Ce détecteur est composé de quatre secteurs isolés entre eux et qui constituent ainsi quatre détecteurs indépendants 1, 2, 3 et 4 (fig.35). Chaque secteur fournit un signal proportionnel au flux qui l'éclaire. Les quatre quadrants ont en principe des caractéristiques rigoureusement identiques puisqu'ils sont tous déposés sur le substrat lors d'une seule évaporation. On utilise ce récepteur en faisant la différence des signaux issus des quadrants 1 et 3 et des quadrants 2 et 4. Une inégalité de flux entre 2 quadrants diamètralement opposés se traduit donc par un signal électrique exploitable.

Supposons que l'éclairement E de la tache sur la cellule soit constant. Le flux tombant sur un élément de surface ΔS vaut $\Delta\phi = E \cdot \Delta S$. On peut ainsi raisonner sur les surfaces plutôt que sur les flux. Considérons un déplacement x du spot suivant l'axe Ox (fig.35), bissecteur des quadrants 1 et 3. La différence des surfaces des quadrants 2 et 4 reste nulle bien que ces surfaces varient. Par contre il apparaît une différence d'aire ΔS entre les surfaces éclairées sur les quadrants 1 et 3. Si nous supposons $x \ll \mathcal{R}$, $\mathcal{R}$ étant le rayon du spot, la surface supplémentaire ΔS_1 sur le quadrant 1 est la somme des surfaces hachurées sur la figure. Elle vaut :

$$\Delta S_1 \simeq \frac{x}{\sqrt{2}} \times \mathcal{R} + \frac{x}{\sqrt{2}}\left(\mathcal{R} + \frac{x}{\sqrt{2}}\right) = 2\,\frac{x}{\sqrt{2}} \cdot \mathcal{R} = \sqrt{2}\, x \cdot \mathcal{R}$$

De même, la surface S_3 devient $S_3 - \Delta S_1$.

La différence entre les surfaces éclairées est donc :

$$\Delta S = 2\,\Delta S_1 = 2\sqrt{2}\, x \cdot \mathcal{R}$$

d'où :

$$\Delta\phi = 2\sqrt{2}\, E \cdot x \cdot \mathcal{R} \qquad (5.3.)$$

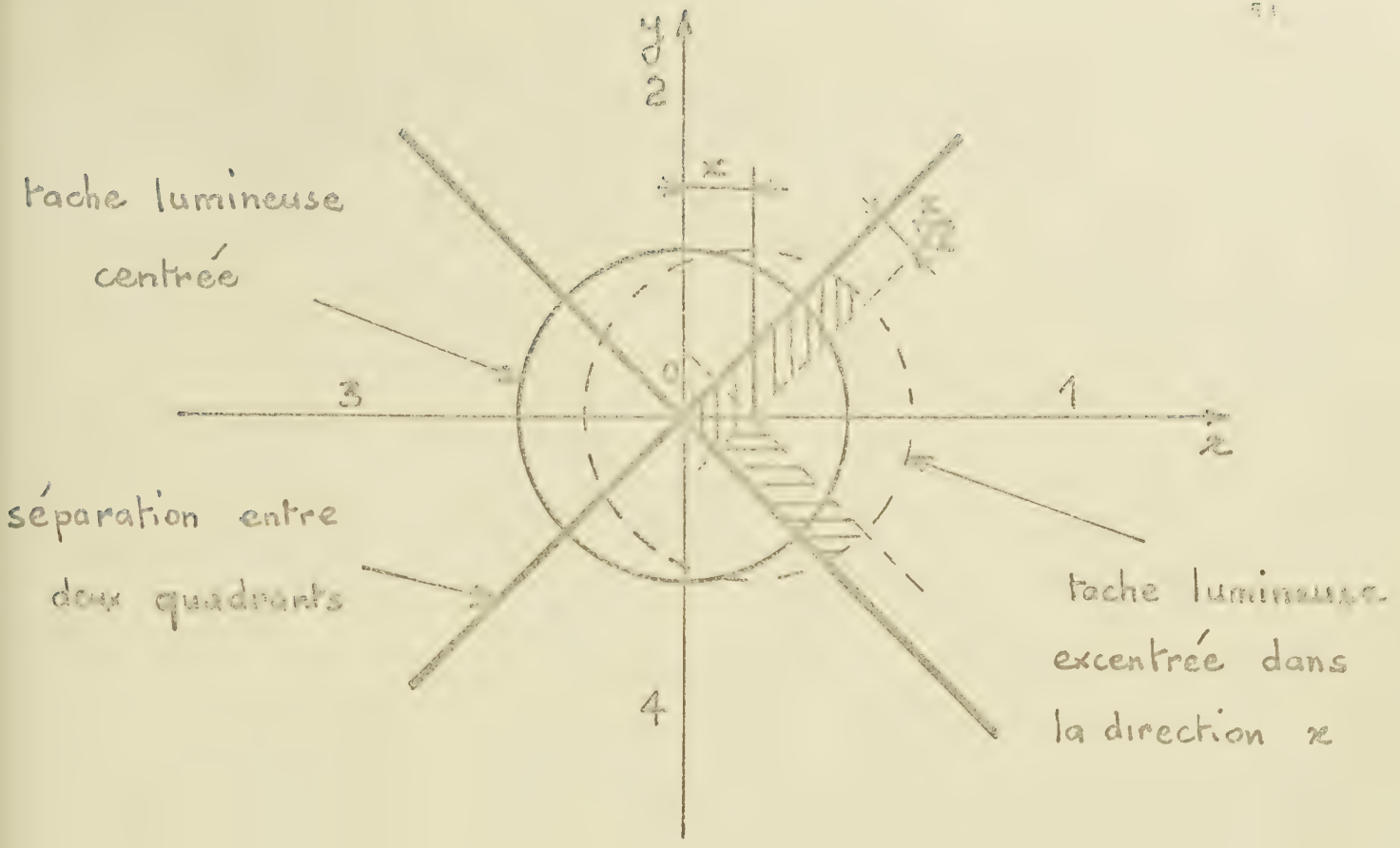

tache lumineuse centrée
séparation entre deux quadrants
tache lumineuse excentrée dans la direction x
y
x
0
1
2
3
4

Fig. 35

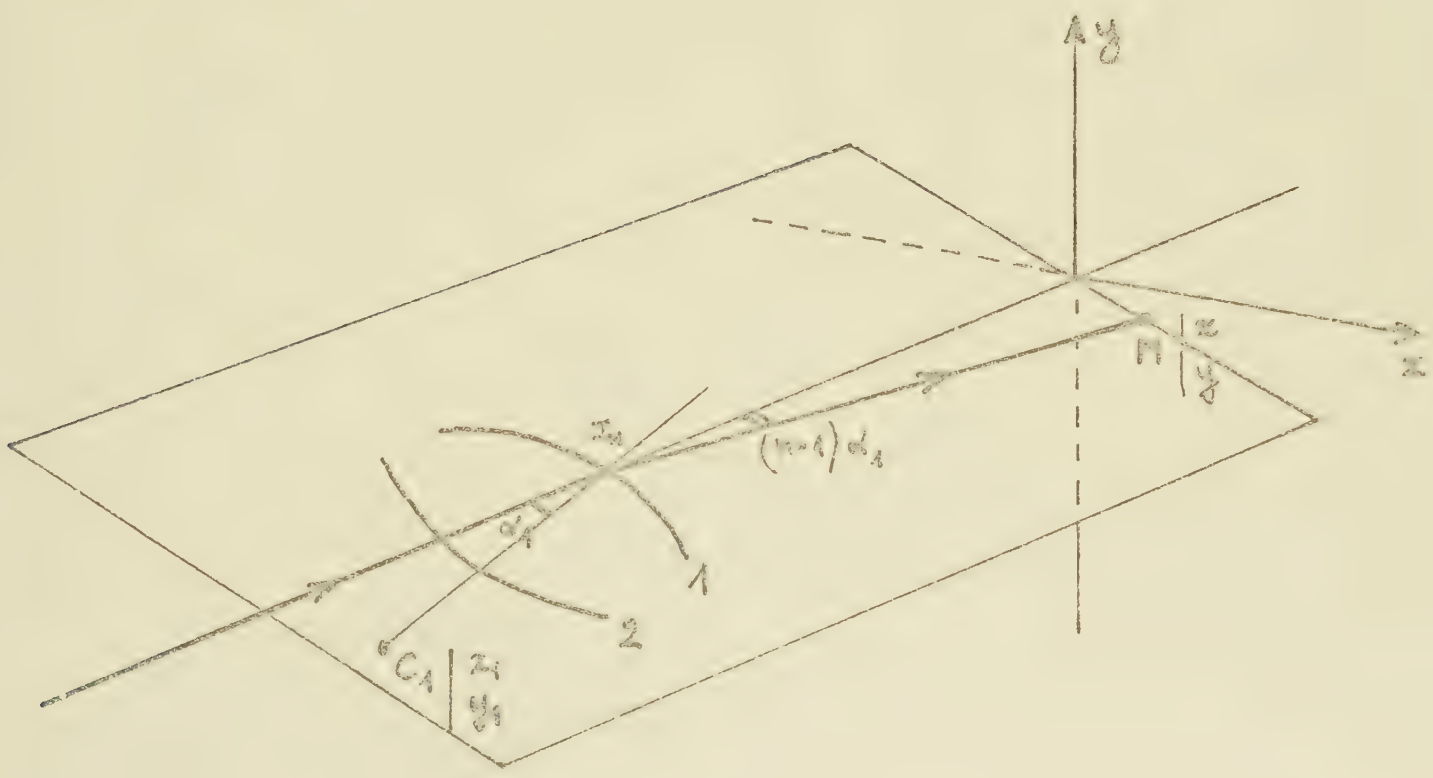

y
x
M
1
2

Fig. 36

Plaçons-nous dans l'hypothèse de la détection par transmission, la lentille reposant sur un listel, et transformons cette expression à l'aide des caractèristiques géométriques du système (fig. 32),

$$\mathcal{R}_1 = D.\theta'$$

$$x = D.\mathcal{D}'$$

θ' est le demi-angle d'ouverture et
$\mathcal{D}'$ la déviation du faisceau correspondant à une inclinaison α_1 de la surface Σ_1 dans l'espace du détecteur. $\mathcal{D}' = g\mathcal{D}$ où g est le grossissement d'un système optique éventuellement interposé entre la lentille à régler et le détecteur.

Calculons l'éclairement sur le détecteur. Nous admettrons que :

- la luminance L du faisceau émis par le trou source T est uniforme,
- l'angle 2θ d'ouverture du faisceau d'entrée est petit. Ceci nous impose bien sûr des conditions très strictes sur les caractéristiques du montage. Après traversée des divers lentilles ou groupes de lentilles, on admettra également que :

  - la luminance L' est uniforme
  - l'angle d'ouverture $2\theta'$ est petit.

Le flux global reçu par le détecteur vaut :
$\phi = L'.G'$ où G' est l'étendue géométrique du faisceau. Si σ' est la surface du trou image T' et D la distance image T' - détecteur, on peut écrire avec les hypothèses faites :

$$\phi = \frac{L'\sigma' S}{D^2}$$

$$\Delta\phi = \frac{L'\sigma' \Delta S}{D^2} = \frac{L'\sigma'}{D^2}.\, 2\sqrt{2}\, D.\theta'.x$$

$$\Delta\phi = 2\sqrt{2}\,\frac{L'\sigma'\theta'}{D}.x \qquad (5.4.)$$

ou en remplaçant x par sa valeur

$$\Delta\phi = 2\sqrt{2}\, L'\sigma'\theta'\mathcal{D}' \qquad (5.5.)$$

Pour un quadrant, l'intensité électrique i circulant dans une résistance de charge r_c est proportionnelle au flux $i = \eta\phi$. A une différence de flux $\Delta\phi$ correspond donc un courant :

$$i_1 - i_3 = i = \eta(\phi_1 - \phi_3) = \eta\,\Delta\phi$$

L'intensité électrique résultant de la différence entre deux quadrants opposés est donc proportionnelle au déplacement x de la tache, et par suite à l'inclinaison α_1 de la lentille par l'intermédiaire de $\mathcal{D}'$ donc de $\mathcal{D}$.

Le raisonnement fait suivant Ox pourrait être répété suivant oY. D'une façon générale, si le spot est centré au point M (x,y) du plan du détecteur, on a :

$$\begin{cases} i_x = K.x \\ i_y = K.y \end{cases}$$

Dans le cas de la transmission avec un listel, la connaissance de ces coordonnées permet de déduire l'angle d'inclinaison α_1 dont la valeur absolue est proportionnelle à $\sqrt{x^2+y^2}$. On peut même ainsi déduire les coordonnées du centre de courbure C_1 de la face à centrer. Le plan d'incidence du rayon moyen zz' sur la face 1 contient zz' et I_1 C_1 normale en I_1 à la surface 1 (fig.36). Il contient aussi le rayon moyen émergent d'après la loi de Descartes et donc le point M qui est le point d'impact de ce rayon sur le détecteur. C_1 est dans la direction α_1 et M dans une direction proportionnelle. Le rayon R_1 étant fixé ainsi que la distance lentille détecteur, on peut affirmer que les coordonnées (x,y) de M sont proportionnelles aux coordonnées (x_1, y_1) de C_1. Tout déplacement du point M dans le plan du détecteur correspond donc à un déplacement proportionnel de C_1 dans un plan perpendiculaire à zz', ce qui sera très utile pour le réglage.

b - Méthode de détection associant l'appareil "transmission" et un comparateur de précision :

Lorsqu'on utilise la méthode par transmission seule, on admet que la face 2 est automatiquement centrée sur un listel. On suppose ainsi implicitement que le listel est parfait et que l'application de la lentille sur le listel est bonne. Par simple souci de vérification, ou parce que la précision demandée l'impose, on peut s'assurer du bon centrage de la face 2 pendant l'expérience, en utilisant un dispositif de contrôle supplémentaire.

Un comparateur mécanique de précision peut convenir dans de nombreux cas. Pour obtenir de grandes précisions cet instrument est de toute façon nécessaire pour contrôler la qualité du listel. On fait maintenant des comparateurs très précis (à $1\,\mu m$, et même à $0{,}1\,\mu m$) d'emploi très facile et nécessitant de très faibles pressions. Nous avons pour notre part employé le comparateur suivant :

- palpeur de type inductif - pression de mesure 10g - bille de contact en nylon.
- boitier électronique d'amplification à affichage digital, permettant d'apprécier quelques microns sur $\pm$ 2 mm et quelques dixièmes de microns sur $\pm$ 0,2 mm. Nous avons choisi une pression de mesure très faible. Elle évite de perturber le réglage de la lentille et diminue les possibilités d'altération des surfaces ou des traitements. Le réglage peut se faire alors en utilisant le système opto électronique et en vérifiant à la fin que la surface 1 est bien centrée dans les tolérances demandées. Un seul tour de la lentille est nécessaire et aucun défraîchissement appréciable ne se produit.

c - Méthode de détection photoélectrique par transmission et réflexion :

La combinaison de l'appareil de détection par transmission avec un dispositif similaire mais fonctionnant par réflexion permet de résoudre le problème du centrage quelle que soit la méthode d'usinage envisagée. La détection par réflexion permettant de recueillir deux informations supplémentaires, on peut donc utiliser cet ensemble :

- pour la méthode de centrage-débordage classique avec listel dans le cas de très grandes précisions. La partie réflexion remplace alors le contrôle mécanique.
- pour les méthodes où on ne déborde que le barillet. On possède maintenant les quatre informations nécessaires en l'absence de listel.

* Principe de la méthode de détection par réflexion :

Le montage de principe est schématisé à la figure 37 . On forme l'image T' du trou T sur la surface Σ_1 de la face 1. Après réflexion sur Σ_1 le faisceau tombe sur un détecteur à quatre quadrants. Si la lentille est bien réglée (fig.38), un rayon incident 1_i repart en 1_e, symétrique de 1_i par rapport à la normale N_1 en T' à Σ_1 . Si un mauvais réglage induit une inclinaison α_1 sur Σ_1 , la normale tourne également de α_1 et le rayon 1_e vient en $1'_e$, subissant ainsi une déviation de $\mathcal{D} = 2\alpha_1$.

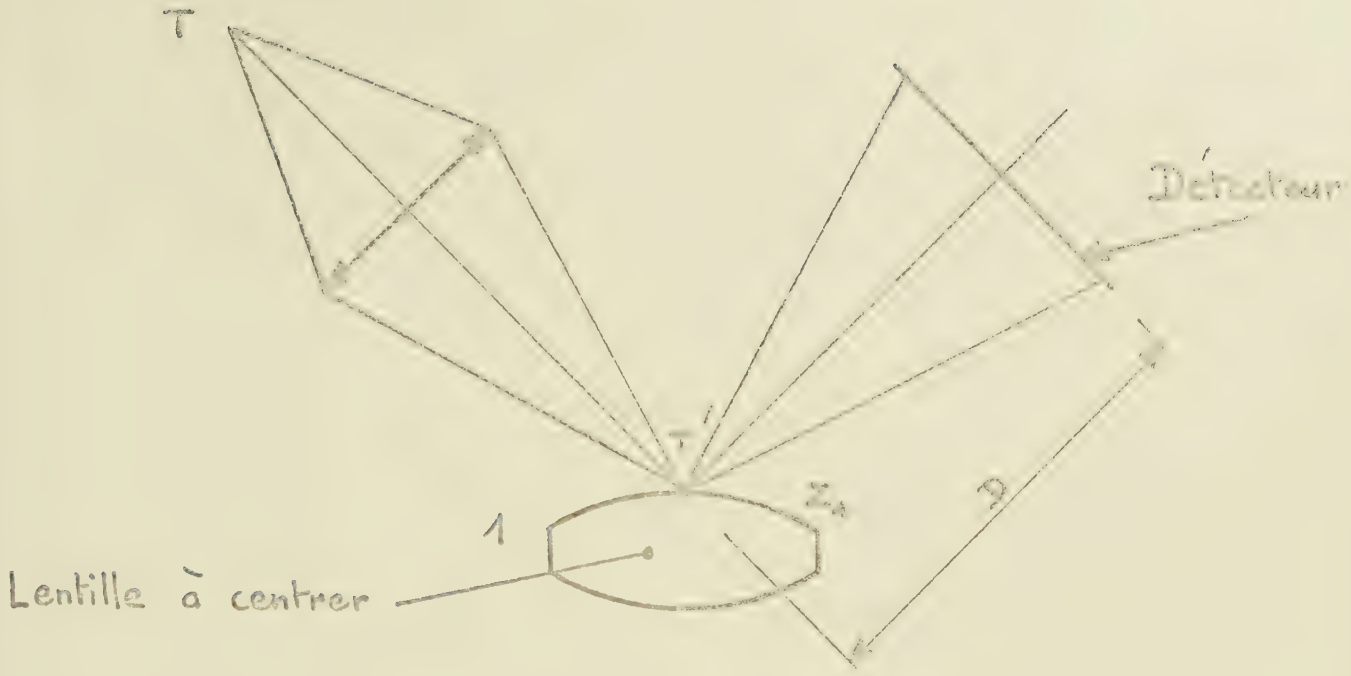


Fig. 37 : Principe de la méthode de détection par réflexion

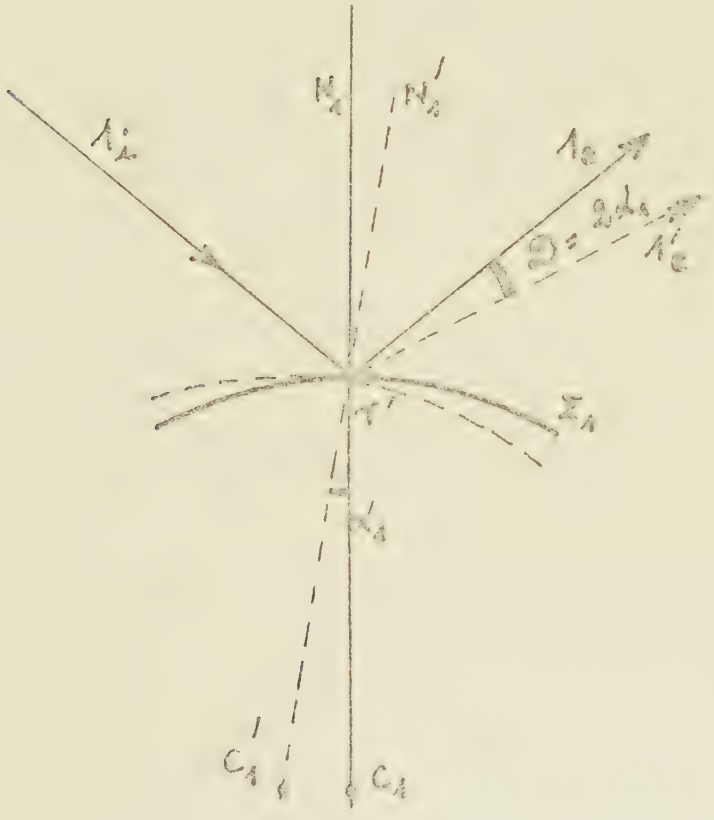


Fig. 38

Supposons que la surface σ' de l'image T' soit suffisamment petite pour assimiler la portion de Σ_1 contenue dans σ' au plan tangent en T' à Σ_1. Le faisceau réfléchi est alors globalement dévié de $\mathcal{D} = 2\alpha_1$. Cette déviation se traduit par un déplacement de la tache sur le détecteur. On exploite le signal comme pour l'appareil "transmission". En faisant les mêmes hypothèses on peut écrire également les équations (5-4) et (5-5).

$$\Delta\phi = 2\sqrt{2}\,\frac{L'\sigma'\theta'}{\mathcal{D}}\,.x$$

ou

$$\Delta\phi = 2\sqrt{2}\,L\sigma'\theta'\mathcal{D}'$$

où L', θ' et $\mathcal{D}'$ sont la luminance, l'ouverture et la déviation dans l'espace du détecteur. On peut montrer exactement de la même manière qu'en transmission avec listel que l'on a sur le détecteur une projection de ce qui se passe dans le plan de C_1.

* Méthode de réglage d'une lentille avec l'ensemble transmission-réflexion :

L'utilisation simultanée des deux systèmes de détection permet de posséder quatre informations. Il faut décoder ces informations de façon à déduire quels paramètres il faut modifier pour le réglage. La méthode la plus simple consiste à essayer de séparer les informations venant des deux faces de la lentille, donc des deux centres de courbure. Les signaux du côté réflexion ne font intervenir que le réglage de la face 1. Par contre, du côté transmission on recueille des signaux liés aux faces 1 et 2. Si α_i est l'inclinaison de la face i, en transmission un signal électrique $\Delta = f(\alpha_1, \alpha_2)$ ne peut pas en général s'écrire sous la forme

$$f(\alpha_1, \alpha_2) = g(\alpha_1) + h(\alpha_2)$$

Les équations générales deviennent vite très complexes et on voit immédiatement que les formules ne sont pas linéaires.

C'est pourquoi nous avons imaginé les processus suivant qui convient dans tous les cas et qui est d'une très grande simplicité de mise en oeuvre. Dans un premier temps, on n'utilise que la partie réflexion. On peut ainsi régler la face 1 en annulant les signaux de cette voie. On sait que l'on a alors réalisé la condition $\alpha_1 = 0$. Les signaux de la voie transmission ne sont plus fonctions que de α_2.

.../...

Nous sommes pratiquement ramenés au cas précédent d'une lentille fixée sur un listel. Il ne reste plus qu'un centre de courbure à régler, mais c'est maintenant C_2 et non plus C_1. Il apparait d'ailleurs un terme correctif dans la formule donnant la déviation $\mathcal{D}$ en fonction de l'inclinaison α_2. Considérons la figure 39 . Le rayon moyen du faisceau incident de la voie transmission est confondu avec l'axe zz' du système. Pour calculer la déviation de ce rayon on peut appliquer la figure (5.1).

$$\mathcal{D} = (n-1)(\delta_2 - \delta_1)$$

où δ_i est l'angle que fait la normale au point d'incidence I_i avec l'axe zz'.

$\delta_2 = \alpha_2$ angle d'inclinaison de la face 2.

$$\delta_1 = \frac{T'I_1}{T'C_1}$$

$$T'I_1 = I_2T' \times \widehat{T'I_2I_1} = e\left(\alpha_2 - \frac{\alpha_2}{n}\right)$$

$$\delta_1 = \frac{e}{R_1}\alpha_2\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

d'où $\mathcal{D} = (n-1)\left[\alpha_2 - \alpha_2\left(\frac{n-1}{n}\right)\frac{e}{R_1}\right]$

soit

(5-6) $$\mathcal{D} = (n-1)\,\alpha_2\left[1 - \underbrace{\left(\frac{n-1}{n}\right)\frac{e}{R_1}}_{\varepsilon}\right]$$

Par rapport à la formule (5 - 2) donnant la déviation correspondant à une inclinaison α_1 de la face 1, on a donc le terme correctif ε .
En prenant n = 1,5 , $\varepsilon = \frac{e}{3R_1}$

Si $\varepsilon \ll 1$, donc $e \ll 3R_1$, on pourra appliquer la même formule que pour la face 1. Cette condition est respectée pour un très grand nombre de lentilles. On n'aura recours à la formule (5-6) que dans quelques cas très particuliers. En utilisant les signaux de la voie transmission, on peut donc annuler et régler complètement la lentille. Il faut cependant s'assurer pendant le réglage de la face 2 que la face 1 est bien restée centrée. Comme il est difficile de régler une des faces sans déplacer l'autre, nous avons pensé asservir la face 1 à être toujours centrée.

.../...

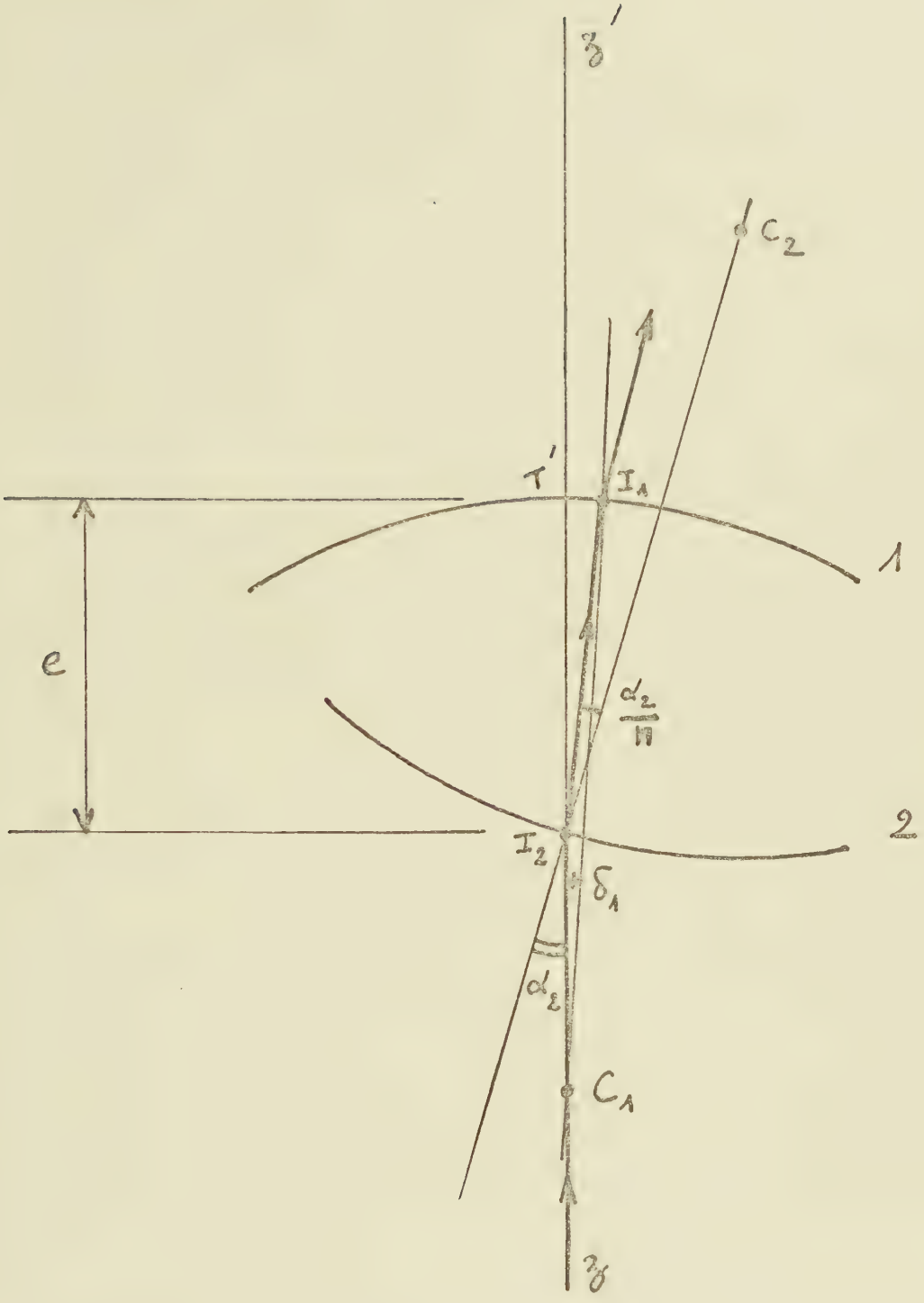


Fig. 39

On utilise pour celà les signaux de la voie réflexion. L'opérateur n'a plus alors qu'à se préoccuper des signaux de la voie transmission pour régler la face 2. La méthode devient donc semi-automatique. Afin de rendre l'opération totalement automatique, on peut aussi envisager d'asservir complètement la lentille à l'aide des quatre informations. La face 1 est asservie à l'aide des signaux de la voie réflexion et la face 2 par ceux de la voie transmission. Ces asservissements supposent que l'on sache intervenir sur les positions des 2 centres de courbure de la lentille. Un moyen simple dans le principe, mais très compliqué et onéreux sur le plan de la réalisation, est constitué par un mandrin réglable à quatre degrés de liberté. Un exemple est décrit dans l'étude bibliographique. D'après une étude de principe sur des lentille de caractéristiques très variées on peut rattacher les deux paramètres de translation à la voie réflexion et les deux paramètres de rotation à la voie transmission.
Les mouvements peuvent être transmis par des moteurs pas à pas ou des cales piezo électriques.

2 - Avantages de ces méthodes :

Les méthodes que nous venons de décrire permettent de résoudre le problème du centrage dans toute sa généralité.

a - Avec le même appareil de base (méthode de détection par transmission), on peut se limiter à des précisions moyennes, mais aussi atteindre de très grandes précisions. Pour celà on peut l'utiliser seul, associé à un comparateur mécanique ou à l'appareil de détection par réflexion.

b - Le réglage est identique quels que soient les rayons de courbure et la puissance de la lentille. On peut indifféremment centrer une lentille de microscopie de très courte focale ou un objectif d'astronomie de grands rayons de courbure.

c - La méthode est utilisable quelle que soit l'épaisseur de la lentille. Il faut simplement prévoir un réglage de focalisation au centre optique afin de se placer dans les conditions optimales d'emploi de l'appareil transmission.

d - Avec l'appareil "transmission-réflexion" on peut avoir simultanément les informations concernant les deux faces. Dans le cas d'un réglage manuel ou semi automatique, l'opérateur peut voir comment évolue le réglage d'une face quand il agit sur l'autre.

e - Enfin cet ensemble permet d'accéder à l'automatisation complète. Ceci nécessite bien sûr des moyens suffisamment puissants (mandrin mobile asservi).

.../...

3 - Sensibilité théorique :

a - Principe opto-électronique :

Nous nous sommes fixés comme but de pouvoir mesurer un excentrement en inclinaison de 10 secondes d'arc. Nous avons pensé qu'il serait souhaitable de pouvoir détecter une seconde d'arc. Le détecteur utilisé a un diamètre utile de 8 mm. Limitons par exemple le spot à un diamètre $2\mathcal{R} = 5$ mm et fixons la distance D de l'image au détecteur à 200 mm.
On peut écrire :

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta S}{S} = \frac{2\sqrt{2}\,\mathcal{R}.D.\mathcal{D}'}{\pi\mathcal{R}^2} = \frac{2\sqrt{2}\,D\,\mathcal{D}'}{\pi\mathcal{R}}$$

Prenons l'exemple de la transmission.

$$\mathcal{D}' = (n-1)\,\alpha_1$$

si $n = 1,5$, $\mathcal{D} = \frac{\alpha_1}{2} = 0,5'' = 2,5\times10^{-6}$

On en déduit que :

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} \simeq 2\times10^{-4}$$

Cet ordre de grandeur montre qu'il faut détecter des variations de flux très faibles. Il est nécessaire que le flux émis par la source soit très stable et qu'on élimine au maximum les sources de signal parasite. Il est bien sûr indispensable de travailler en lumière modulée et nous avons choisi d'employer pour le traitement du signal électrique un amplificateur à détection synchrone.

L'utilisation d'un détecteur à quatre quadrants pose le problème de modulation suivant : comment faire en sorte que l'obscurité se fasse simultanément sur deux quadrants opposés ? Si tel n'est pas le cas, il se produit (fig. 40) une dissymétrie sans l'obturation des quadrants qui se traduit par des temps de montée τ_1 et τ_3 différents pour les signaux modulés A_1 et A_3 des quadrants 1 et 3.L'amplitude des paliers $(A_1)_m$ et $(A_3)_m$ est voisine. Supposons par exemple $(A_1)_m - (A_3)_m = 10^{-3} \times (A_1)_m$. Si on fait la différence $A_1 - A_3$, on va bien trouver le palier souhaité $(A_1)_m - (A_3)_m$, mais on va aussi trouver des signaux transitoires d'amplitude de l'ordre de $(A_1)_m$. Dans le cas envisagé ceci se traduira par un signal utile noyé dans des signaux parasites d'amplitude 1000 fois plus grande.

.../...

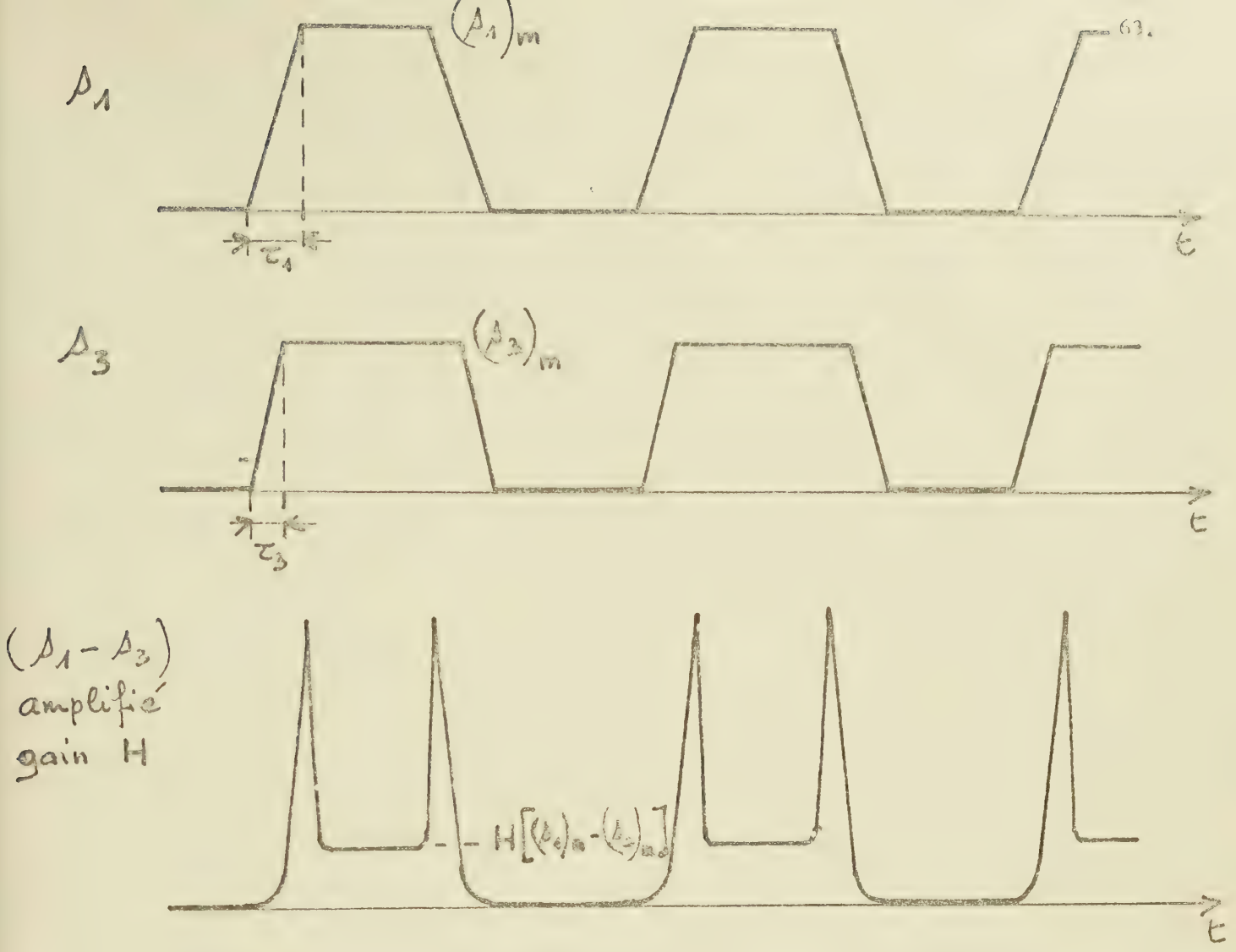

A_1
$(A_1)_m$
τ_1
t
A_3
$(A_3)_m$
τ_3
t
$(A_1 - A_3)$
amplifié
gain H
$H[(A_1)_m - (A_3)_m]$
t

Fig. 40

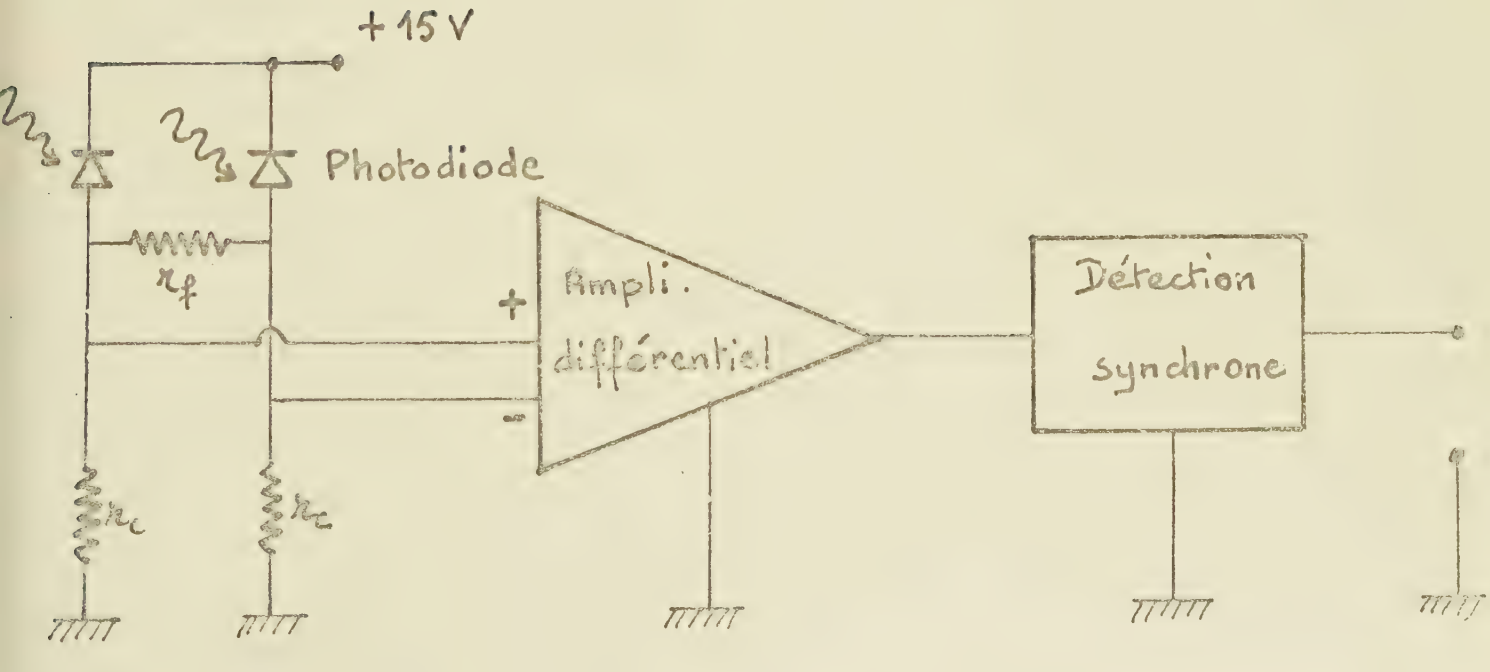

+15 V
Photodiode
r_f
+
-
Ampli.
différentiel
Détection
synchrone
r_c
r_c

Fig. 41

La détection sera impossible. On peut alors envisager deux types de modulation : soit une modulation qui permet une obscurité simultanée en tous les points du détecteur, soit une modulation qui obscurcit progressivement mais de façon rigoureusement symétrique deux quadrants opposés.

Le premier type de modulation exclut l'usage d'un modulateur mécanique. On peut alors penser aux modulateurs électro-optiques. Mais ils imposent en général l'utilisation d'un faisceau laser, que nous devons exclure ici étant donné entre autres l'instabilité du flux émis. Il reste une solution qui est la modulation de la source elle-même. Ce procédé n'est praticable que sur un nombre très limité de sources. Nous avons essayé l'une d'entre elles qui s'est avérée très convenable : c'est une diode émettrice à arséniure de Gallium (AsGa) qui émet dans le proche infra-rouge (0,9 μm). Cette diode a de plus un maximum d'émission qui correspond au maximum de sensibilité des photodiodes au silicium.

Nous avons pu réaliser le deuxième type de modulation à l'aide d'un "chopper" à diapason. L'obturation se fait à l'aide de deux petites pales fixées sur les bras du diapason. L'écartement maximum des pales est de 1 mm. Vu cette faible amplitude de vibration, nous modulons dans une image, puisque c'est là que le faisceau a la plus petite dimension. La fréquence de vibration d'un tel modulateur est d'une fixité remarquable.

La chaîne électronique de détection est schématisée à la figure 41 . L'intensité débitée par un quadrant traverse une résistance de charge r_c. Les tensions aux bornes descharges des deux quadrants opposés sont amplifiées séparément, puis retranchées dans un amplificateur différentiel qui permet d'attaquer la détection synchrone à un niveau suffisant. Le signal démodulé en sortie de détection synchrone est mesuré sur un enregistreur ou un oscilloscope. L'utilisation d'un oscilloscope présente un très grand intérêt. Les signaux correspondant aux coordonnées x et y du détecteur sont utilisés pour les amplificateurs x et y de l'oscilloscope et les coordonnées du spot sur l'écran de l'oscilloscope sont proportionnelles à celle du centre de la tache sur le détecteur. Prenons l'exemple de la méthode transmission : ces coordonnées sont proportionnelles aux coordonnées x_1, y_1 du centre de courbure C_1 dans son plan. Si l'opérateur fait tourner la lentille excentrée, C_1 tourne autour de l'axe zz' et le spot décrit un cercle proportionnel sur l'écran de l'oscilloscope. Pour centrer la lentille il suffit de réduire ce cercle pour que son diamètre corresponde à la précision recherchée. L'opérateur sait exactement où agir puisqu'il a sur l'écran de l'oscilloscope une projection de ce qui se passe dans le plan de C_1. Il en est de même pour la méthode réflexion.

.../...

b. Sensibilité théorique :

L'ensemble de la chaine électronique a été calculé pour que le bruit provienne essentiellement du détecteur. Nous supposerons donc dans tout le raisonnement que le bruit de l'amplificateur différentiel et de la détection synchrone sont négligeables devant le bruit dû au capteur.
Pour notre montage (fig. 41) les causes de bruit sont donc :

- le bruit de grenaille ou bruit Schottky de puissance P_{bg} relatif au détecteur (nous avons choisi une photodiode au silicium).

- le bruit thermique ou bruit Johnson de puissance P_{bth} qui apparait dans la résistance de charge r_c.

Pour un quadrant de la photodiode la puissance de bruit est :

$$P_b = P_{bth} + P_{bg} = 4\ k\ T\ B + 2\ er_c\ (I_o + I_s)\ B$$

k constante de Boltzmann
T température absolue de la résistance r_c
B bande passante énergétique équivalente de bruit de la chaine électronique
e charge de l'électron
I_o courant d'obscurité de la photodiode
I_s courant de signal débité par un quadrant.

Nous faisons la différence des signaux issus de deux quadrants diamètralement opposés. Le bruit qui se superpose au signal différence est donc la somme des bruits dûs à chaque élément, soit :

$$P_b = P_{b1} + P_{b2}$$

Les caractéristiques des quadrants sont théoriquement identiques et nous supposons que les résistances de charge sont égales $r_{c1} = r_{c2} = r_c$. D'autre part, on cherche à détecter de très petites différences de flux. Donc, $I_{s1} \simeq I_{s2} = I_s$ et on peut écrire :

$$P_b = 2P_{b1} = 2P_{b2} = 2\left[4k\ T\ B + 2e\ r_c\ (I_o + I_s)\ B\right]$$

.../...

De cette puissance de bruit, on peut tirer la tension efficace du bruit V_b.

$$V_b = \sqrt{r_c \, P_b} = \sqrt{8 r_c \, k \, T \, B + 4e \, r_c^2 \, (I_o + I_s) \, B}$$

Nous allons calculer cette tension au niveau de la résistance de charge r_c. Les valeurs numériques des différents paramètres sont les suivantes :

- I_o : valeur fournie par le constructeur et vérifiée expérimentalement, $I_o = 10^{-6}$ A

- I_s, courant de signal issu d'un quadrant : il est égal à $I_s = 3 \times 10^{-7}$ A, pour un flux de 10^{-6} W environ.

- k et e, constantes universelles

$$\begin{cases} k = 1{,}38 \times 10^{-23} & J/°K \\ e = 1{,}6 \times 10^{-19} & \text{Coulomb} \end{cases}$$

- r_c, résistance de charge :

Il existe une résistance de fuite r_f entre deux quadrants opposés. Si l'on veut que tout le courant de signal I_s traverse la résistance de charge r_c, il faut que $r_c \ll r_f \simeq 1$ MΩ. La bande passante Δf du filtre constitué par r_c et les capacités parasites (de l'ordre de c = 50 pF pour un élément) doit être suffisamment large pour qu'il y ait une bonne transmission de la fréquence de modulation f_m = 1 kHz :

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi r_c c} \gg f_m$$

d'où : $r_c \ll 3{,}2$ MΩ ce qui est assuré par la condition précédente. D'autre part, la puissance de signal vaut $r_c \, I_s^2$. On adonc intérêt à ce que r_c soit grand. Nous avons choisi $r_c = 10$ kΩ qui s'est révélée être une valeur convenable.

- T, température absolue de la résistance de charge r_c : nous prendrons T = 300° k.

- B, bande passante énergétique équivalente de bruit :

.../...

C'est la bande passante de bruit du filtre passe-bas constitué par r_c et la capacité d'un élément c = 50 pF. C'est un filtre du 1er ordre de pente - 6dB/octave. La bande passante à - 3 dB vaut $\Delta f = \frac{1}{2\pi r_c C}$ et la bande passante de bruit $B = \frac{\pi}{2} \cdot \Delta f = \frac{1}{4 r_c c}$. On en déduit B = 500 kHz.

En remplaçant chaque lettre par sa valeur dans l'expression de Vb, on trouve :

$$V_b = 22\ \mu V \quad \text{en valeur efficace}$$

La détection synchrone se comporte comme un filtre sélectif. Un de ses avantages vient du fait que la bande passante peut être rendue sensiblement plus étroite que celle des meilleurs filtres sélectifs. Cet appareil permet d'améliorer le rapport signal sur bruit $\frac{s}{b}$ dans le rapport des racines carrées des bandes passantes de bruit. Le filtre de sortie de la détection synchrone ayant une pente de - 12 dB/octave, la bande passante à - 6dB vaut $\Delta f' = \frac{1}{2\pi\tau'}$, et la bande passante équivalente de bruit vaut $B' = \frac{\pi}{4} \cdot \Delta f' = \frac{1}{8\tau'}$

Nous utilisons une constante de temps $\tau' = 1{,}25$ s, ce qui donne B' = 0,1Hz.

Soit $\frac{s}{b}$ le rapport signal sur bruit à l'entrée de la détection synchrone et $\frac{s'}{b'}$, le même rapport à la sortie. L'amélioration de ce rapport vaut :

$$\frac{\left(\frac{s'}{b'}\right)}{\left(\frac{s}{b}\right)} = \sqrt{\frac{B}{B'}} = 2\,240$$

Si on admet que l'on peut détecter un signal tel que $\frac{s'}{b'} = 1$, on a à l'entrée de la détection synchrone $\frac{s}{b} = \frac{1}{2240}$. On détecte donc un signal 2240 fois inférieur au bruit et dans ces conditions, le signal minimum détectable théorique vaut :

$$s = \frac{Vb}{2240} = \frac{22}{2240} = 10 \text{ nv en valeur efficace}$$

Nous utilisons une modulation en créneau. Partant d'un flux continu ϕ_o , on forme un flux modulé d'amplitude crête à crête $\phi_{cc} = \phi_o$ et de rapport cyclique 1/2. Au flux ϕ_o correspond aux bornes de r_c une tension de signal V_o. En utilisant le développement en série de Fourier, on montre que l'amplitude du fondamental d'un tel signal vaut $V_f = \frac{2}{\pi} V_o$. La valeur efficace du fondamental vaut alors $V_{eff} = \frac{Vf}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_o$. Sur le galvanomètre de mesure de la détection synchrone, on peut lire la valeur efficace V_{eff} du fondamental du signal. Pour passer de cette valeur efficace Veff au signal lui-même V_o, il faut donc multiplier par $\frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2{,}2$. Le signal minimum détectable théorique vaut donc :

s = 22 nV

Cherchons l'angle minimum auquel correspond ce signal. Le détecteur a une sensibilité de 0,4 A/W. L'intensité électrique i vaut donc 0,4 Ø. D'autre part, la résistance de charge r_c vaut 10^4 k donc :

$$i = \frac{\Delta}{r_c} = 2,2 \times 10^{-12} A$$

on en déduit :

$$\Delta\phi = \frac{i}{0,4} = 5,5 \times 10^{-12} W$$

Considérons l'équation (5-5)

$$\Delta\phi = 2\sqrt{2}\, L'\sigma'\theta'\mathcal{D}'$$

* Dans le cas de l'expérience par transmission si nous nous plaçons avec le montage de la figure 32 , et si nous focalisons au centre optique, nous avons :

. $L' \simeq L$ luminance de la source, les transmissions de l'objectif O et de la lentille à centrer étant voisines de 1.

. $\theta' = \theta$, demi-angle d'ouverture avant traversée de la lentille.

. $\mathcal{D}' = (n-1)\alpha_1 = 0,5\,\alpha_1$ pour n = 1,5

Dans le cas de notre expérience nous avons choisi les caractéristiques suivantes :

- $L = 75 \times 10^{-4}$ W/mm²/stéradian. Nous utilisons une lampe à ruban de tungstène qui permet d'avoir un flux stable et une luminance uniforme. Nous avons mesuré cette luminance pour une intensité d'alimentation de 15 A.

- $2\theta = \frac{1}{30}$. C'est l'ouverture maximale imposée par le diamètre intérieur de la broche supportant la lentille.

- le diamètre du trou source est égal à 0,4 mm. On recueille ainsi un flux suffisant et on ne s'éloigne pas trop des conditions idéales de l'optique géométrique. En prenant le grandissement de l'objectif égal à 1, on a $\sigma' = \sigma = 0,12$ mm².

De ces conditions, on peut déduire la valeur de α_1 en partant de $\Delta\phi$

$$\alpha_1 = \frac{\Delta\phi}{2\sqrt{2}\, L\sigma\theta(n-1)}$$

.../...

Ce qui conduit avec les valeurs numériques précédentes à une valeur de l'angle minimum détectable théorique :

$$\alpha_1 = \frac{5}{100} \quad \text{de seconde d'arc}$$

On peut donc espérer détecter facilement une seconde avec notre montage.

* Dans le cas du montage par réflexion les données sont les suivantes :

. $L' \simeq \frac{L}{25}$ puisque le facteur de réflexion d'un verre nu est de 4 %.
. $\theta' = \theta$ demi-angle d'ouverture incident
. $\mathcal{D}' = 2\alpha_1$

Nous supposerons que la lampe et le trou source sont les mêmes que dans l'expérience transmission. L'ouverture vaut maintenant $2\theta = \frac{1}{4}$. On peut déduire l'angle minimum détectable :

$$\alpha_1 = \frac{25\,\Delta\phi}{4\sqrt{2}\,L\sigma}$$

soit $\alpha_1 = 2{,}1 \times 10^{-7} = \frac{4}{100}$ de seconde d'arc.

Dans les conditions expérimentales choisies les sensibilités théoriques sont donc comparables dans les deux méthodes.

.../...

4. Dispositif de détection par transmission :

a - Description :

Nous avons choisi pour le montage définitif de travailler avec une lampe à ruban de tungstène et un modulateur à diapason. L'image du filament de la lampe est formée sur un trou source T (fig. 42), à l'aide de l'objectif O_1. L'objectif O_2 conjugue T avec le modulateur et (O_3 O_4) permet de focaliser le faisceau au centre optique de la lentille à centrer T'. Le faisceau repris par (O_5 O_6) passe par le trou d'épuration T" conjugué de T' et tombe sur le détecteur. L'objectif (O_5-O_6) et le trou T" servent à supprimer la lumière parasite.

L'épaisseur de la lentille pouvant varier et le centre optique pouvant occuper des positions assez différentes, il fallait prévoir un dispositif permettant de confondre au mieux T' et le centre optique. Le faisceau étant parallèle entre O_3 et O_4, la mise au point est assurée par la translation de la lentille O_4. L'ensemble miroir escamotable, réticule, oculaire permet de vérifier que le diamètre du faisceau est inférieur au diamère du détecteur et donc qu'il n'y a pas de perte de flux. On peut translater le détecteur de façon à assurer cette condition.

b - Sensibilité expérimentale :

Quand nous avons déterminé la sensibilité théorique, nous n'avons tenu compte que du bruit de la photodiode. Nous avons ainsi vérifié que le principe choisi pouvait résoudre le problème posé. Mais en nous plaçant dans cette situation idéale, nous avons éliminé toutes les sources de fluctuations pouvant apparaître dans une chaîne complexe : Source photométrique, modulation, montage mécanique, bruit propre des amplificateurs. L'expérience a très vite confirmé que l'accumulation de ces facteurs limite la sensibilité. Cependant, même dans les plus mauvaises conditions, cette sensibilité est très nettement suffisante et assure la mesure d'un excentrement angulaire de 10 secondes d'arc. La mesure s'effectue en mesurant le diamètre du cercle décrit par le spot d'un oscilloscope. Un excentrement de 10 secondes se traduit donc par un cercle de diamètre 20 secondes. Partant du principe que l'on peut détecter en sortie de l'amplificateur à détection synchrone un signal minimum égal au bruit, nous ne chiffrerons pas les signaux ou bruits électroniques en volts, mais par la valeur correspondante en secondes d'arc, ce qui est plus significatif.

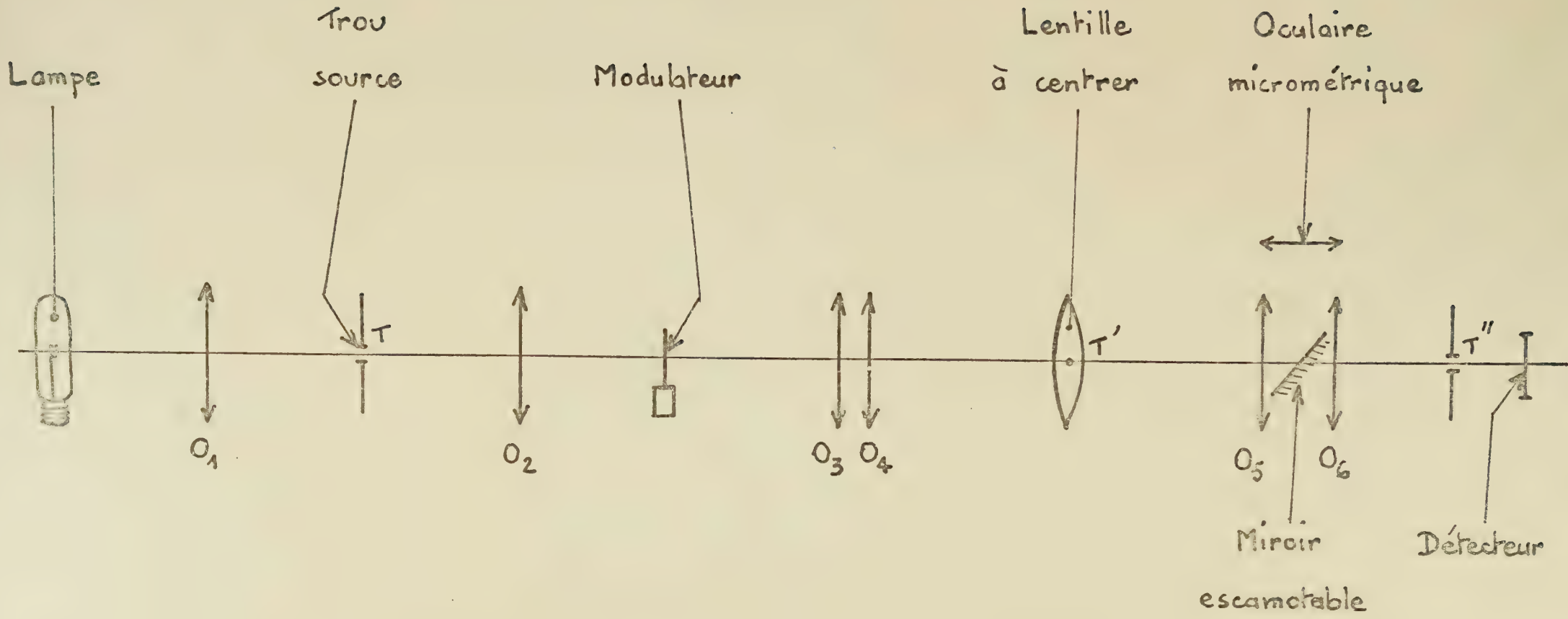


Fig 42 : Schéma optique détaillé du système de détection par transmission

VUE D'ENSEMBLE DU DISPOSITIF DE DETECTION PAR TRANSMISSION

* Bruit d'obscurité :

Nous travaillons dans des conditions telles que le courant de signal I_S issu de la photodiode est de l'ordre du courant d'obscurité I_o. Si nous mesurons le bruit alors qu'aucun flux (même parasite) ne parvient sur le détecteur, nous aurons un ordre de grandeur du bruit relatif à la photodiode, et éventuellement à la chaîne électronique. On trouve une valeur de l'ordre de 1/10 de seconde d'arc, ce qui est en bon accord avec la théorie.

* Bruit en présence de signal modulé :

Le flux utile tombant sur le détecteur est modulé à 800 Hz.

- Montage d'essai sur marbre : les conditions photométriques sont exactement celles énoncées dans le calcul théorique. Le bruit est égal à 0,8 seconde d'arc. Ce montage, composé d'optiques de courtes focales, fixés magnétiquement sur un marbre de 500 Kgs est d'une très grande inertie mécanique et thermique.

- Montage élaboré définitif : nous avons préféré travailler avec une image du trou source de 0,8 mm de diamètre au niveau de la lentille à centrer, quand les rayons de courbure de ces lentilles le permettent. Ceci permet d'utiliser une luminance égale au quart de la luminance théorique et ainsi de diminuer l'intensité électrique de la lampe de 15 à 11,5 A ; l'échauffement dû à la lampe est beaucoup moins élevé, et la durée de vie de celle-ci est considérablement angmentée. Nous avons également prévu des images de 0,4 mm et 0,2 mm de diamètre pour les lentilles de faible rayon de courbure. Une commutation de gain permet de compenser la perte de flux. Nous avons obtenu les valeurs expérimantales suivantes :

. image de diamètre 0,8 mm : le bruit est inférieur à 1 seconde d'arc (0,5 seconde dans les meilleures conditions). Nous sommes donc assurés d'une précision de 5 % sur la mesure d'un excentrement de 10 secondes (cercle de diamètre 20 secondes).

. image de diamètre 0,4 mm : la sensibilité est alors de 2 secondes d'arc.

. image de diamètre 0,2 mm : le bruit est inférieur à 10 secondes d'arc (5 secondes dans les meilleures conditions). Nous sommes donc assurés dans le cas des petites lentilles, où l'on doit mesurer un excentrement d'une minute (cercle de diamètre 2 minutes), d'une précision de 8 % environ.

.../...

Nous avons donc très largement rempli notre contrat, qui veut simplement que l'erreur sur l'excentrement soit de 10 secondes pour des lentilles de quelques centimètres de diamètre, et de 1 minute pour des lentilles de quelques millimètres de diamètre (microscopie).

* Linéarité :

La relation entre le signal électrique et l'inclinaison de la lentille est linéaire dans un domaine très large. Il fallait s'assurer qu'aucun phénomène non linéaire ne venait perturber la mesure. Nous avons ainsi vérifié que notre chaîne de détection est linéaire :

- à 3 % près dans une gamme allant de 0 à 1 minute d'arc.
- à 2 % près sur une gamme s'étendant de 1 à 10 minutes d'arc.

* Stabilité :

- Thermique : On pouvait raisonnablement s'attendre à des dérives thermiques, puisque tous les éléments mécaniques ou électroniques sont susceptibles de varier. Nous avons vérifié que ces dérives sont peu importantes et n'engendrent qu'un décalage négligeable, dont notre procédé de mesure permet de s'affranchir.

Nous avons remarqué que la partie du montage comprise entre la lampe et la broche était sensible à un gradient de température. Si on réalise un capot isolant bien cette partie, on s'affranchit totalement de ces phénomènes parasites.

- Mécanique : La très grande sensibilité demandée nécessite bien sûr un montage mécanique parfaitement étudié. Par exemple, un déplacement de 4 µm seulement sur le détecteur correspond à un angle de 10 secondes. Avec notre montage bien adapté et dans des conditions normales d'utilisation, nous n'avons eu aucun problème, bien qu'il n'y ait aucune isolation mécanique.

5 - Dispositif de détection par réflexion :

a - Description :

Nous n'avons pas réalisé d'appareil pour ce dispositif. Sa construction ne présentait aucune originalité par rapport au dispositif de détection par transmission et nous avons limité son étude à un montage d'essai sur marbre.

Nous avons préféré utiliser comme source une diode émettrice à arséniure de Gallium (AsGa). La modulation se fait sur la source elle-même et nous n'utilisons donc plus de modulateur à diapason.

.../...

Le montage est représenté à la figure 43. L'image de la surface émettrice de la diode AsGa est formée sur un trou T à l'aide de l'objectif O_1. L'objectif O_2 conjugue T avec le point T' de la surface à centrer Σ situé sur son axe. Le faisceau réflêchi par Σ est repris par O_3, passe par le trou d'épuration T" conjugué de T', et tombe sur le détecteur.

b - Sensibilité expérimentale :

Pour chiffrer les performances, nous prenons les mêmes critères que pour le dispositif de détection par transmission, puisque la mesure s'effectue de façon identique. Nous avons utilisé le même détecteur et lamême chaîne électronique, donc nous ne parlerons pas du bruit d'obscurité qui n'a bien sûr pas changé.

* Bruit et stabilité :

Nous avons conservé la luminance théorique.

- Avec une image de diamètre 0,4 mm au niveau de la surface à centrer, qui doit avoir un rayon de courbure assez grand, le bruit correspond à 0,8 seconde d'arc (4 % sur la mesure de 10 secondes).

- Pour les lentilles de faible rayon de courbure, nous utilisons une image de diamètre 0,1 mm et la sensibilité est de l'ordre de 15 secondes. Sur la mesure d'un angle d'une minute, nous pouvons donc espérer une précision de 12 %.

Ce dispositif permet donc également un réglage nettement meilleur que la tolérance exigée.

La linéarité de la mesure est identique à celle du dispositif par transmission. Nous n'avons eu aucun problème de stabilité avec ce montage qui était supporté par le marbre déjà décrit.

* Influence du traitement des surfaces :

Il arrive fréquemment que les lentilles à centrer soit déjà revêtues d'un traitement anti-réflêchissant. Si ce traitement est prévu pour le visible, ce qui englobe la majorité des cas, l'utilisation d'une diode AsGa est tout à fait favorable. En effet, un traitement calculé pour que son facteur de réflexion soit minimal sur la gamme $0,4\mu$ - $0,7\mu$ a un facteur de réflexion supérieur à 4 % pour $0,85\mu$ (parfois jusqu'à 10 %).

.../...

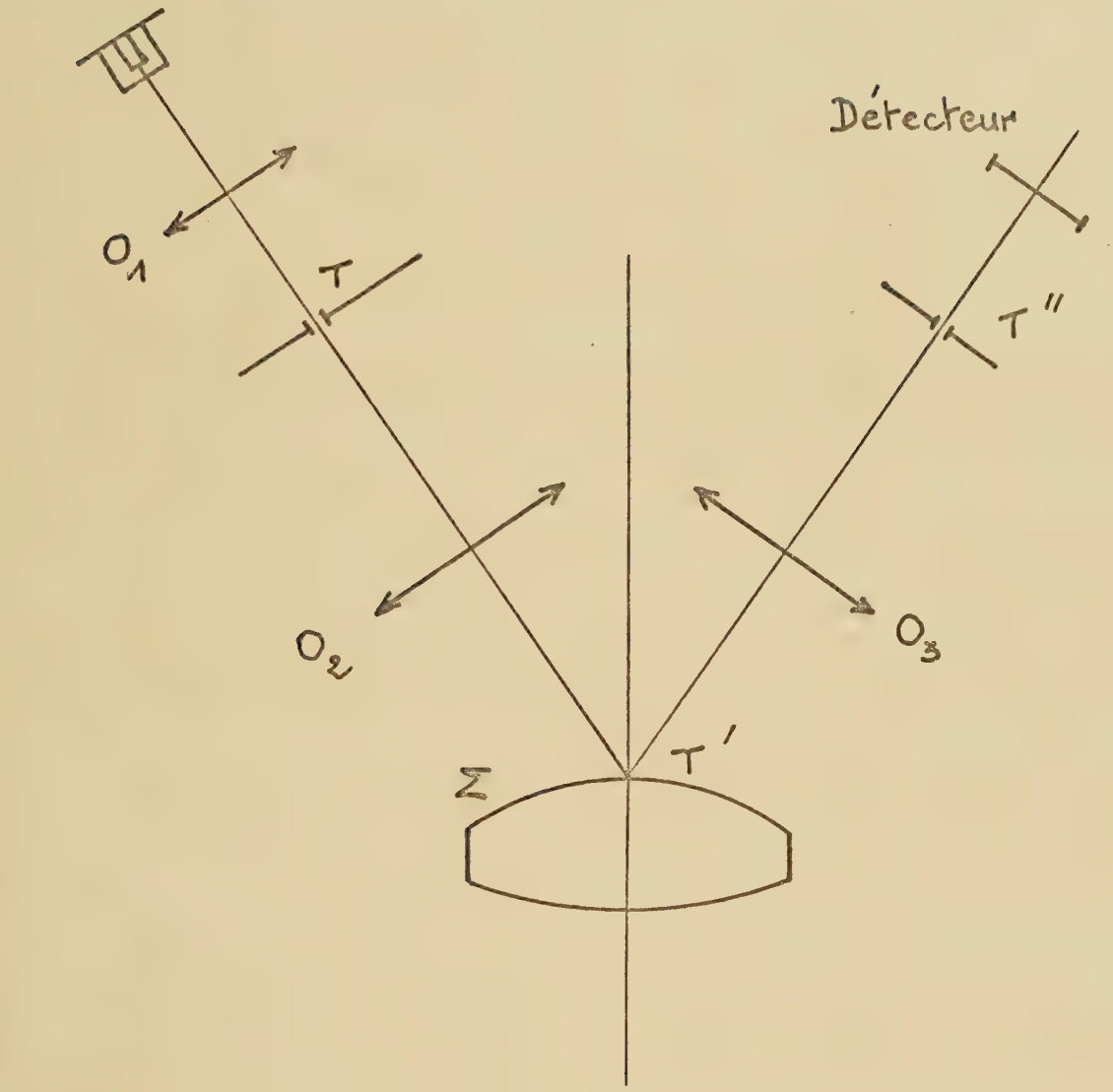


Fig. 43 : Schéma optique du dispositif de détection par réflexion

* Influence de la qualité du poli.

Nous avons également regardé l'influence de la structure microscopique de la surface à centrer. Il existe des lentilles utilisées dans des instruments de grande précision, pour lesquelles la tolérance sur la qualité du poli n'est pas très sévère. Comme nous n'utilisons qu'une très petite surface sur la lentille, on pouvait s'attendre à ce qu'un mauvais poli perturbe la mesure. Nous avons en fait constaté qu'il faut une surface très peu polie ("grise" dans le jargon d'opticien) pour observer une inflence notable.

VII. RESULTATS :

Nous nous sommes assurés que chaque élément de notre ensemble remplissait les conditions nécessaires à un bon réglage et en particulier les conditions de sensibilité et de stabilité. Il ne nous restait plus qu'à vérifier notre appareillage dans les conditions d'utilisation. Nous avons fait nos essais sur deux séries de lentilles : une série de lentilles plan-convexes de rayon R = 70 mm, diamètre 50 mm, une autre série de lentilles plan-convexes de rayon R = 11 mm, diamètre 10 mm. Dans les deux cas, nous avons fait les opérations suivantes :

- usinage du listel sur notre ensemble mécanique,
- collage et centrage de la lentille avec le système de détection d'excentrement,
- contrôle du centrage des faces de la lentille avec le palpeur mécanique inductif au 1/10 de micron (déjà décrit),
- débordage de la lentille à une cote donnée,
- nouveau contrôle du centrage à l'aide de la détection et du palpeur,
- contrôle de la bonne rotation du cylindre extérieur au palpeur.

Nous n'avons pas rencontré de problème lors du centrage proprement dit et du débordage. Tous les contrôles ont été positifs, et nous avons même obtenu des précisions meilleures que la tolérance recherchée : 5 secondes d'arc pour les lentilles de rayon R = 70 mm, et 15 secondes pour les lentilles de rayon R = 11 mm. La stabilité de la colle et la répétitivité des opérations se sont également avérées excellentes. Pour cette dernière nous avons fait un test décisif. Nous avons centré puis débordé une lentille, en faisant tous les contrôles prévus. Nous l'avons ensuite décollée puis recentrée. Nous avons vérifié alors que le pourtour de la lentille était à nouveau centré dans les tolérances.

L'expérience a montré que le maintien de la lentille pendant le centrage devait être fait différemment de ce qui était prévu. Nous devons coller la lentille avant centrage et la plaquer sur le listel par dépression. Notre ciment a un point de fusion de 40° environ et le réglage est rapide. Si le listel a une masse suffisante, la chaleur emmagasinée lors du collage suffit à maintenir le ciment malléable pendant tout le réglage.

Pour l'usinage du listel, nous avons pu obtenir avec un outil de coupe un cylindre ayant un excentrement inférieur à 0,5 µm, et un plan de contact qui ne s'écarte pas plus de 0,8 µm du plan perpendiculaire à l'axe.

Les tolérances sont donc respectées. Si l'on veut faire mieux, des solutions techniques existent, notamment du point de vue broche, et nous en avons déjà parlé. La matière du listel est également importante. Nous pensons que le laiton traditionnel devrait être remplacé par l'acier. L'acier, peu fragile, doit conduire à une rectification de meilleure qualité. Des essais complémentaires devraient nous permettre de conclure prochainement de façon catégorique.

Le chauffage nécessaire au collage est une difficulté déjà évoquée qui subsiste. L'utilisation d'un bec bunsen, n'est pas très commode. Ce n'est pas un auxiliaire souple, permettant un chauffage rapide et uniforme. Nous avons pensé à deux systèmes pouvant le remplacer avec profit. Le premier a déjà fait ses preuves dans un autre domaine. C'est un ensemble de petits becs de gaz répartis autour du listel. On obtient ainsi une répartition uniforme de la chaleur. La commande peut être effectuée au pied, ce qui libère l'opérateur. Dans un second temps, nous avons envisagé l'emploi du chauffage par induction. Ce chauffage, produit localement par induction d'un courant à haute fréquence, est évidemment idéal, puisque sans flamme ni contact. Il est uniforme si l'on adapte l'inducteur à l'induit, et peut être rapide si le tube du listel est peu conducteur de la chaleur. Nous n'avons pas pu acheter d'appareil. Mais nous avons eu de nombreux entretiens techniques avec un fournisseur éventuel et nous avons pu faire un essai simple. La puissance optimale de l'inducteur se situe vers 500 watts. Il est évident que pour ce chauffage, il serait préférable de faire des listels en acier, le temps de chauffage étant cinq fois moins long.

VII. DETECTION DE L'ELEMENT DEFAILLANT D'UN OBJECTIF MONTE :

Quand un objectif est entièrement monté, il s'avère parfois au cours du contrôle final qu'on n'obtient pas la qualité optique souhaitée, un des éléments n'étant pas placé correctement. De nombreuses méthodes permettent de déceler l'influence de cet excentrement sur la qualité de l'image finale. On peut utiliser, par exemple, la mesure de la fonction de transfert, le contrôle interférométrique de la qualité de la surface d'onde ou l'analyse de la tache de diffraction. Ces méthodes donnent un résultat global. Il serait intéressant pour le fabricant d'identifier l'élément défaillant, afin de pouvoir améliorer sa fabrication et le régler dans la bonne position. Nous avons recherché des méthodes permettant cette identification.

A. Principe général des méthodes étudiées :

Un point source éclaire le système optique à étudier. Chaque dioptre réfléchit un peu de lumière et on peut observer une série d'images qui correspondent à chaque réflexion. Si les différentes lentilles sont parfaitement centrées, ces images et la source sont toutes situées dans un même plan contenant l'axe optique du système. Si la source est sur l'axe optique, toutes les images sont sur ce même axe. Dans le cas où un dioptre est excentré, l'image réfléchie est située en dehors de ce plan ou de cet axe. S'il y a plusieurs excentrements, les décalages des images sont dus à l'action combinée des dioptres qui précèdent.

Les coordonnées ξ_i, η_i de l'image par réflexion sur le dioptre n° i peuvent être en première approximation reliées de façon linéaire aux paramètres d'excentrement du dioptre k, par exemple les coordonnées x_k , y_k du centre de courbure C_k . On obtient ainsi un système d'équations qui peut s'écrire sous forme matricielle. Mais dans le cas général, la linéarité des relations n'est pas assurée. Même si l'on recourt au modèle matriciel, les calculs sont complexes et imposent l'emploi de l'ordinateur.

Nous ne nous préoccuperons pas ici de ces problèmes de calcul. Notre but est de rechercher le principe de méthodes permettant de déterminer de façon précise et systématique les coordonnées ξ_i, η_i des images par réflexion sur le dioptre n° i.

Nous pourrons ainsi transmettre au calculateur les données permettant de déduire les excentrements éventuels des dioptres.

B. Dispositifs de mesure :

Pour effectuer les mesures, deux types de systèmes ont été étudiés.

1. Utilisation d'un"axicon" :

a. Principe :

On donne le nom d'axicon à un système optique possédant une forte aberration sphérique. L'association d'une surface plane et d'un cône constitue un exemple simple, et nous ferons allusion à un tel système quand nous parlerons d'axicon par la suite.

Considérons une lentille simple utilisée à grande ouverture (fig.44). Du fait de l'aberration sphérique, l'enveloppe des rayons émergents issus d'un point A est une surface caustique composée de deux nappes : la nappe tangentielle N_s et la nappe sagittale N_t dégénérée en un segment de droite. La lumière se concentrant sur cette partie de l'axe, on peut dire qu'à un point objet correspond un segment de droite image, la position du point image sur ce segment dépendant de la hauteur d'incidence.

Dans le cas de l'axicon [13], la nappe sagittale de la caustique est un segment de droite beaucoup plus grand que dans le cas d'une lentille simple (fig. 45). La nappe tangentielle est virtuelle : sa section par le plan méridien donne les deux petits arcs N_t sur la figure. Tout point du segment N_s peut donc être considéré comme image du point A.

Supposons maintenant que nous ayons plusieurs points lumineux répartis sur le segment N_s. Ils donnent dans l'espace de A plusieurs segments images qui se chevauchent et le point A appartient nécessairement à chacun d'entre eux. Il est donc possible en utilisant un axicon de former dans un plan fixe des "images" de points situés dans des plans différents. Si tous les points ne sont pas exactement sur l'axe, les nappes sagittales ne sont pas colinéaires, et on observe plusieurs taches sur un écran placé en A, chacune d'elles correspondant à un point lumineux.

.../...

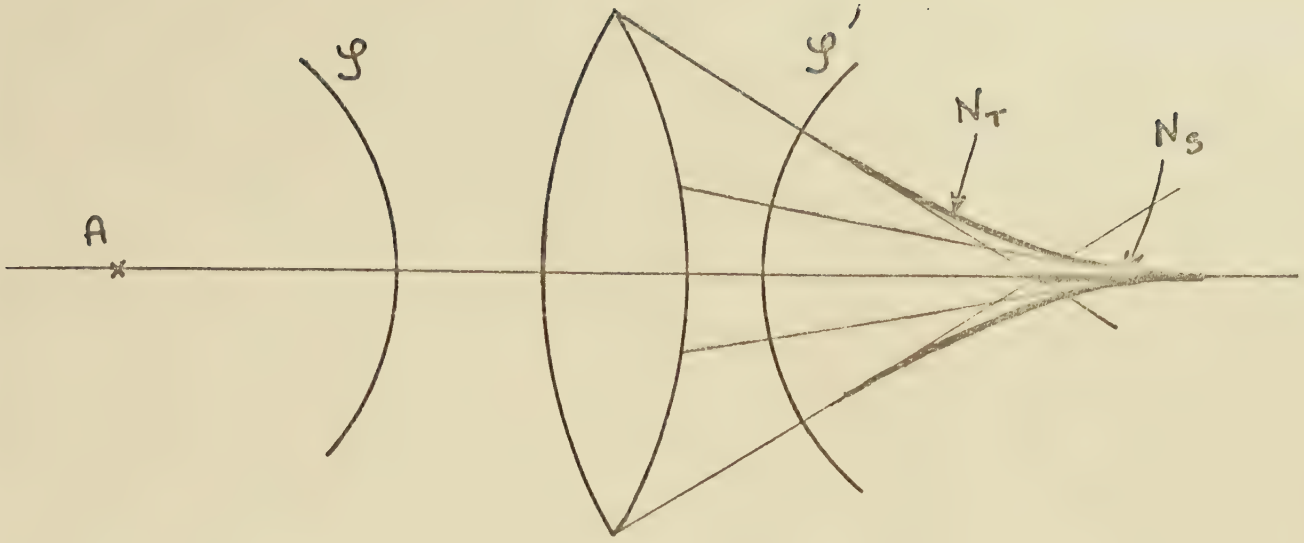


Fig. 44

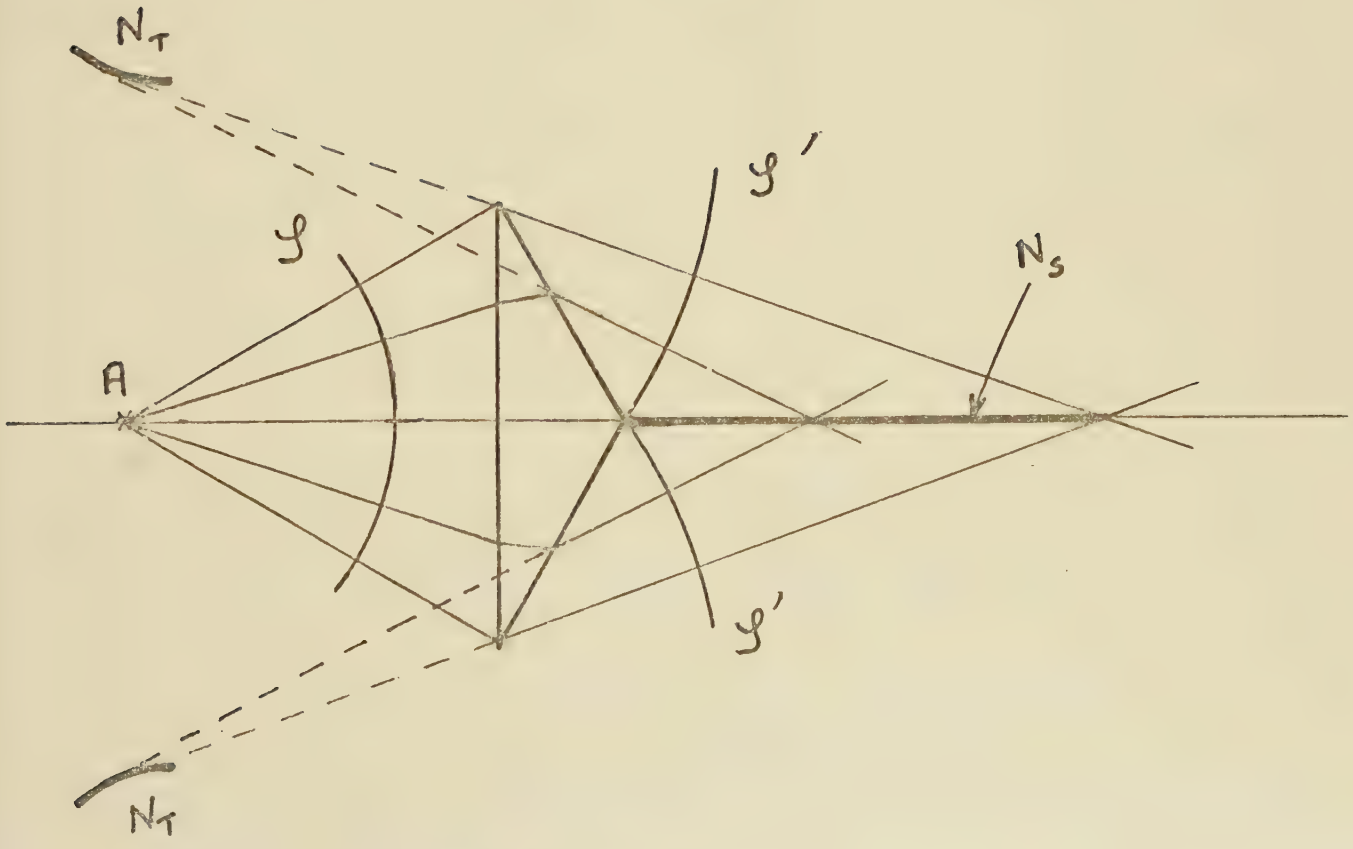


Fig. 45

Les objectifs à étudier étant presque centrés, les points lumineux sont peu éloignés de l'axe. Il est très difficile de séparer les différentes taches images dont la qualité est mauvaise. Pour identifier les images obtenues par réflexion sur les différents dioptres, et mesurer leurs excentrements, il il est préférable d'incliner l'axicon par rapport à l'axe de l'objectif [14]. Les taches images données par l'axicon sont alors bien séparées dans le plan d'observation. Si l'objectif est parfait, ces taches sont alignées. Dans le cas contraire, elles forment une ligne brisée (fig.46), et de la position de ces taches, on peut déduire quels sont les dioptres défectueux.

Pour faire une mesure, il faut matérialiser l'axe optique idéal du système à étudier. La solution la plus simple consiste à fixer l'objectif sur une broche de précision et à le faire tourner. Les images obtenues par réflexion décrivent alors des cercles centrés sur l'axe de la broche. Dans le plan d'observation les taches images décrivent également des cercles dont le rayon est proportionnel à la distance de l'image par réflexion sur le dioptre à l'axe de rotation (fig.47). On peut alors prendre une photographie du phénomène et faire les mesures sur cette dernière.

b. Montage expérimental :

Un laser et un objectif de microscope permettent d'obtenir un point lumineux émettant dans une ouverture suffisante pour couvrir la pupille du système à étudier (fig. 48). Une séparatrice permet de renvoyer la lumière réfléchie par les dioptres vers l'axicon. On observe les images à l'aide d'un viseur. On peut également remplacer l'oculaire de ce viseur par une chambre photographique.

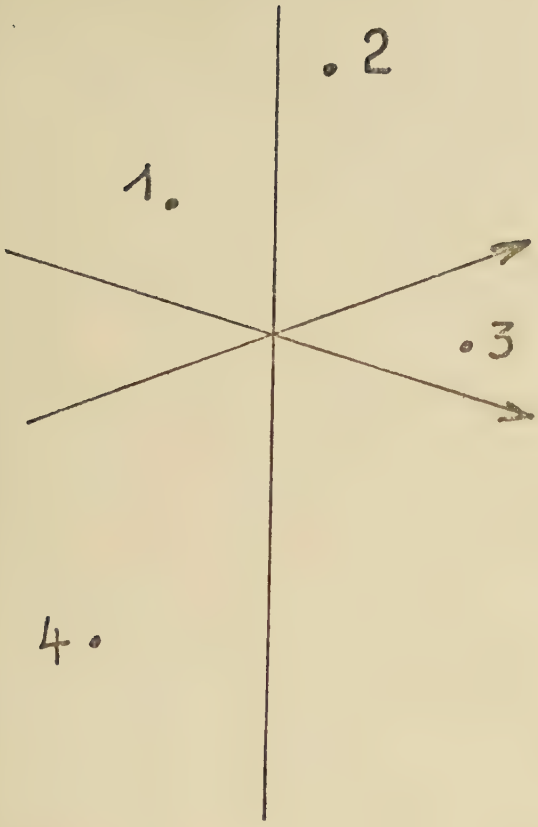
* Sensibilité :

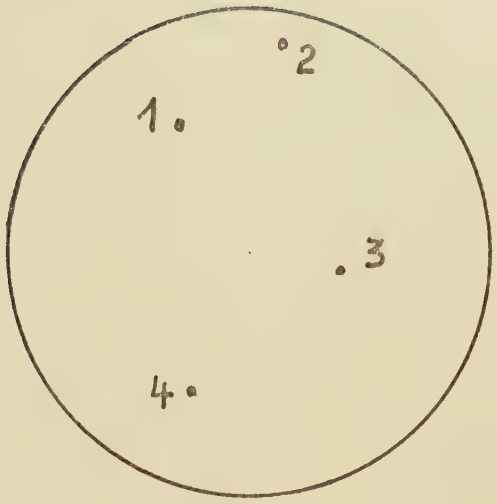
Nous avons d'abord évalué la sensibilité du montage avec un dioptre concave de rayon 50 mm. Un déplacement de 2 μm du centre de courbure est le plus petit excentrement décelable dans ces conditions. Ceci correspond à un excentrement angulaire du dioptre de 8 secondes d'arc. Avec une surface plane, nous avons trouvé une sensibilité angulaire du même ordre, environ 5 secondes d'arc.

* Difficultés rencontrées au cours de la manipulation :

- la mise en coïncidence de l'axe optique du système et de l'axe de rotation de la broche est difficile. Cette condition est fondamentale pour les mesures. Si elle n'est pas respectée, le décalage entre l'axe optique et l'axe de rotation de la broche fausse complètement les résultats.

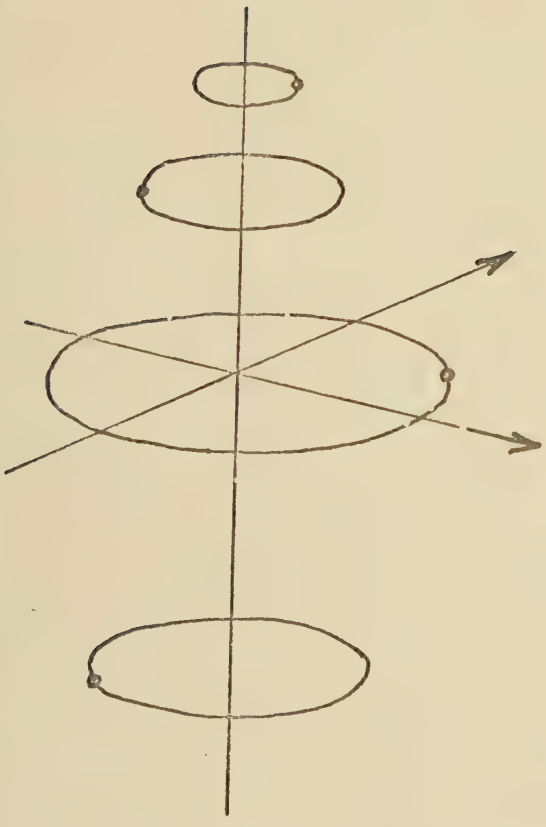
.../...

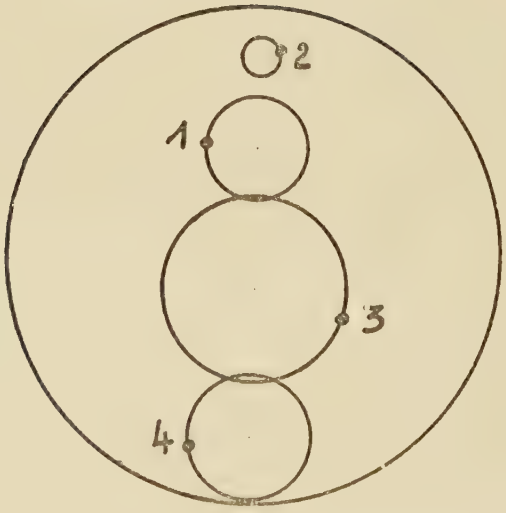




vue à travers
l'axicon

Fig. 46





vue à travers
l'axicon

Fig. 47

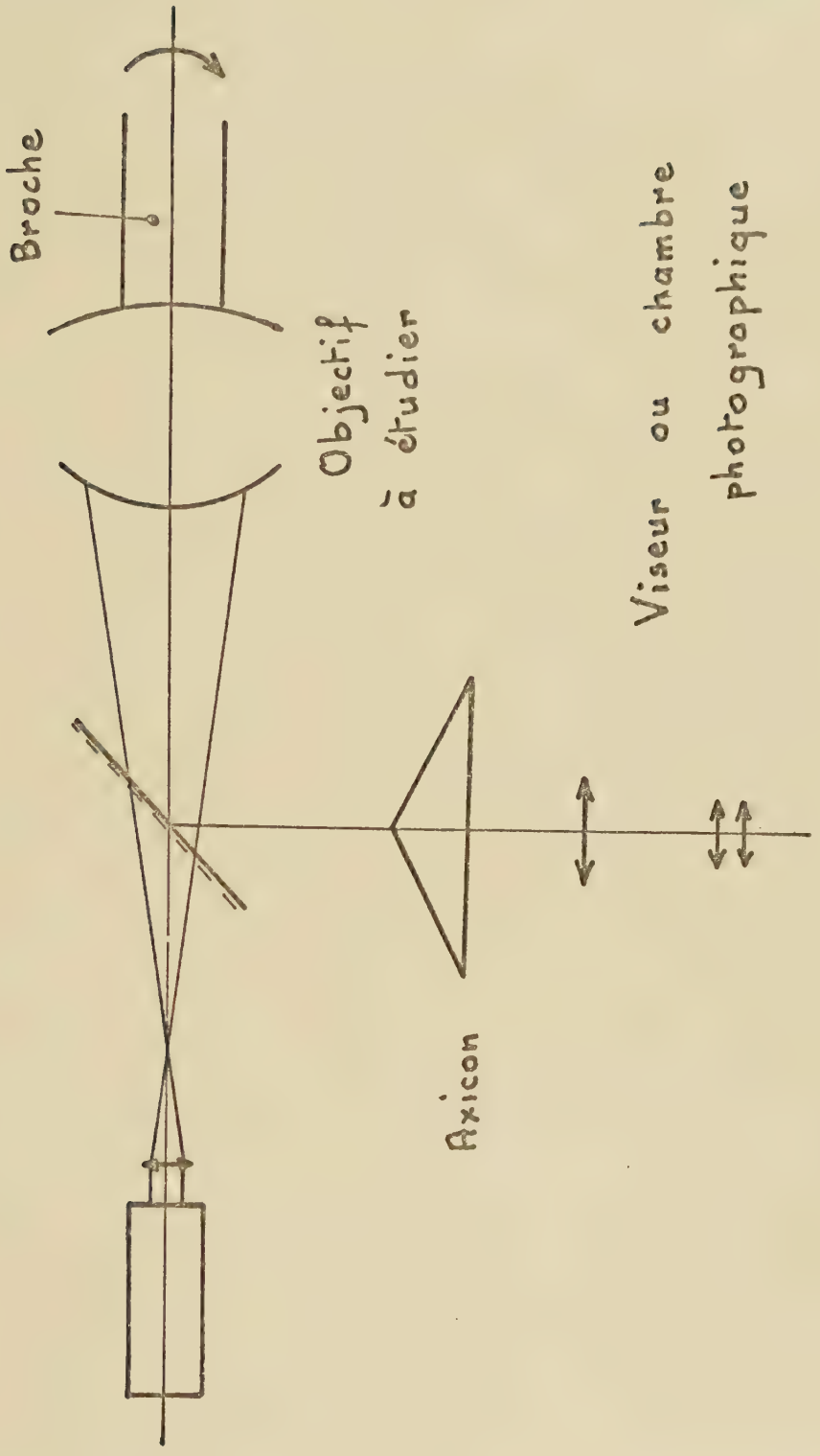
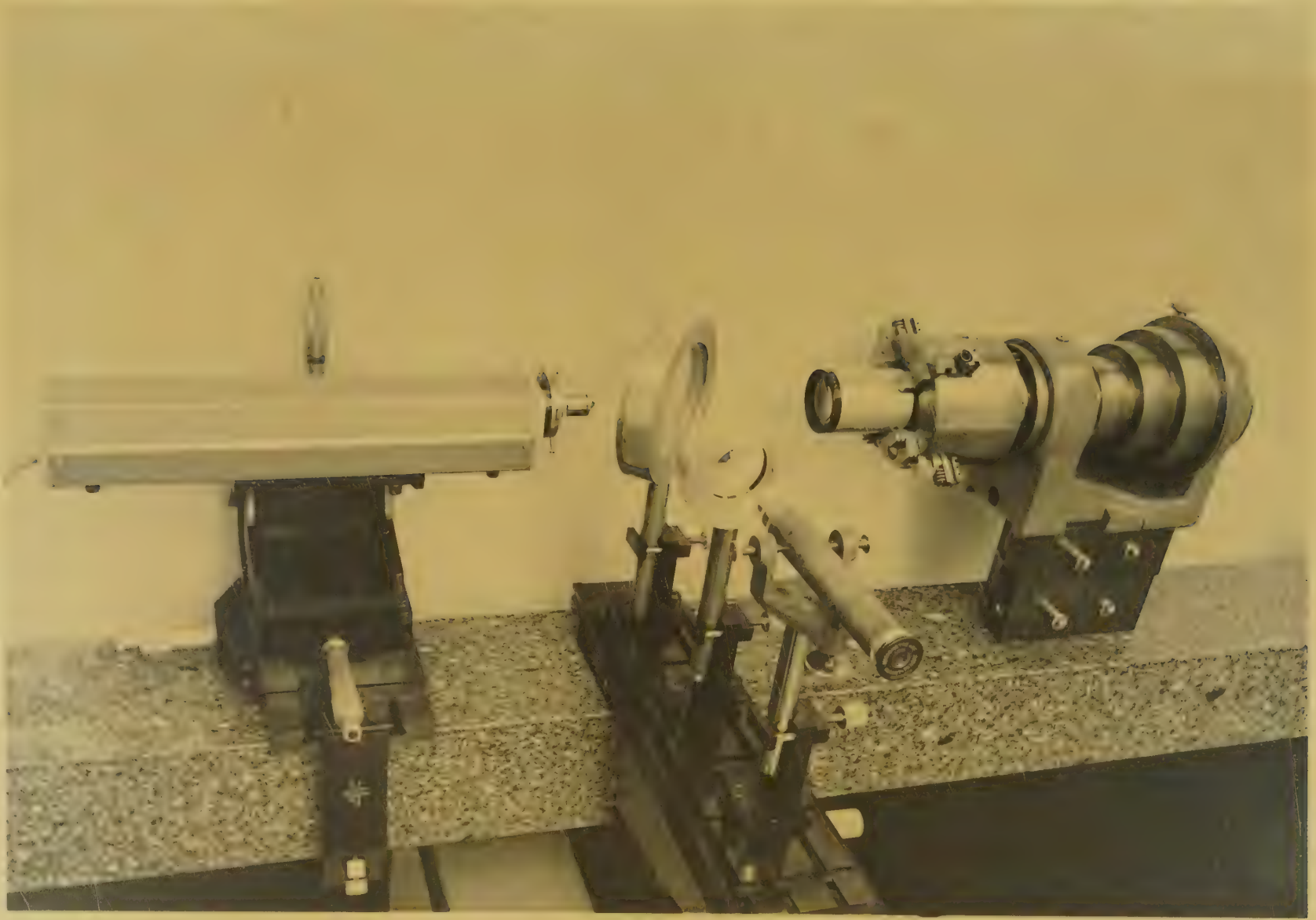

Broche
Objectif
à étudier
Viseur ou chambre
photographique
Axicon

Fig. 48



MONTAGE UTILISANT L'AXICON

Pour confondre les deux axes, il faut que le mandrin supportant le système possède quatre degrés de liberté : deux de translation et deux de rotation. Un tel système déjà évoqué dans la description de l'ensemble de détection réflexion-transmission, n'est malheureusement pas à la portée de nos moyens. Nous n'avons donc pu faire qu'une étude qualitative de ce montage.

- Etalonnage : si l'on se fixe un plan d'observation, il est bien évident que le "grandissement" de l'axicon variera avec la position des images réfléchies par les dioptres. Il suffit pour étalonner de localiser ces images et de déterminer le "grandissement" pour chaque position, avec le montage de simulation utilisé pour la détermination de la sensibilité par exemple.

* Résultats :

Les résultats sont visibles sur les photographies 49 et 50 qui ont été obtenues avec :

- un objectif composé de 3 verres pour la figure 49 (deux images confondues).

- un objectif composé de 2 verres seulement pour la figure 50 . On peut remarquer sur cette photographie que les cercles ne sont pas très réguliers. Ces irrégularités proviennent des défauts de rotation de la broche. Si l'on admet des irrégularités égales au $\frac{1}{10}$ de la valeur de l'excentrement minimal mesurable, il faut que la broche tourne à mieux que 0,2 μm.

2. Systèmes à dédoublement d'images :

a. Principe :

Les méthodes que nous allons évoquer maintenant sont en général utilisées pour les alignements. Pour localiser des points sur une droite Δ , il faut trouver un système optique qui permette de différencier ceux qui sont sur cette droite et ceux qui sont en dehors. Un procédé simple consiste à dédoubler les images des points non situés sur la droite. Un instrument donnant d'un point P quelconque deux images symétriques P' et P" par rapport à l'image Δ' de Δ possède la propriété voulue : seuls les points de Δ possèdent une image unique, située sur Δ'. Nous avons envisagé plusieurs systèmes fonctionnant ainsi.

.../...

FIG. 49 : CONTROLE D'UN OBJECTIF DE TROIS VERRES

FIG. 50 : CONTROLE D'UN OBJECTIF DE DEUX VERRES

b. Méthode des deux équerres optiques [15]:

Considérons l'équerre optique constituée comme l'indique la figure 51 . Le prisme pentagonal classique est composé de deux parties accolées. Sur leur surface commune est déposé un traitement semi-réfléchissant. D'un rayon incident d'orientation quelconque, situé dans le plan de la figure, ce système donne deux rayons émergents : l'un réfléchi par la surface semi-transparente, l'autre perpendiculaire au rayon incident, provenant des réflexions sur les faces du prisme. Si le rayon incident fait un angle χ avec la normale à la face d'entrée, les deux rayons émergents font entre eux un angle 2χ .
Un rayon incident perpendiculaire à la face d'entrée donne donc deux émergents parallèles. Si de plus, ce rayon est dans le plan médiateur de la face d'entrée, les deux émergents sont confondus. Les points objets situés dans ce plan donneront des images non dédoublées et un tel prisme détermine donc un plan dans l'espace. Si l'on veut déterminer une droite comme c'est notre but, il suffit de croiser deux prismes identiques (fig. 52).

On peut certainement imaginer un grand nombre de combinaisons de prismes permettant d'obtenir le même résultat. Parmi les solutions compactes, on peut citer le prisme de Koester par exemple (fig. 53). Ce prisme peut être considéré comme l'association d'un cube de Lummer et de deux prismes en toit orthogonaux. La figure 54 montre le fonctionnement de ce prisme.

c. Méthode d'alignement de J.TERRIEN [16] utilisant un système à double image :

* Description :

Le principe est représenté à la figure 55. Soit une droite Λ et un plan Π perdiculaire en P à Λ . Si d'un objet A_1A_2, on forme une première image $A'_1A'_2$ symétrique de A_1A_2 par rapport au plan Π , et une deuxième image $A''_1A''_2$ symétrique de A_1A_2 par rapport au point P, les deux images $A'_1A'_2$ et $A''_1A''_2$ sont symétriques par rapport à la droite Λ . Seuls les points situés sur Λ ont une seule image située sur Λ .

Pour obtenir une symétrie par rapport à un point, on peut utiliser un trièdre trirectangle, ou par exemple le système afocal décrit à la figure 56 . Un miroir plan est situé au foyer image d'une lentille convergente. On voit facilement que d'un objet A_1A_2, ce système donne une image symétrique de A_1A_2 par rapport au foyer objet F. Si l'on place d'autre part en F une lame semi-réfléchissante g perpendiculaire à l'axe optique Λ de la lentille, les conditions précédentes sont réunies.

.../...

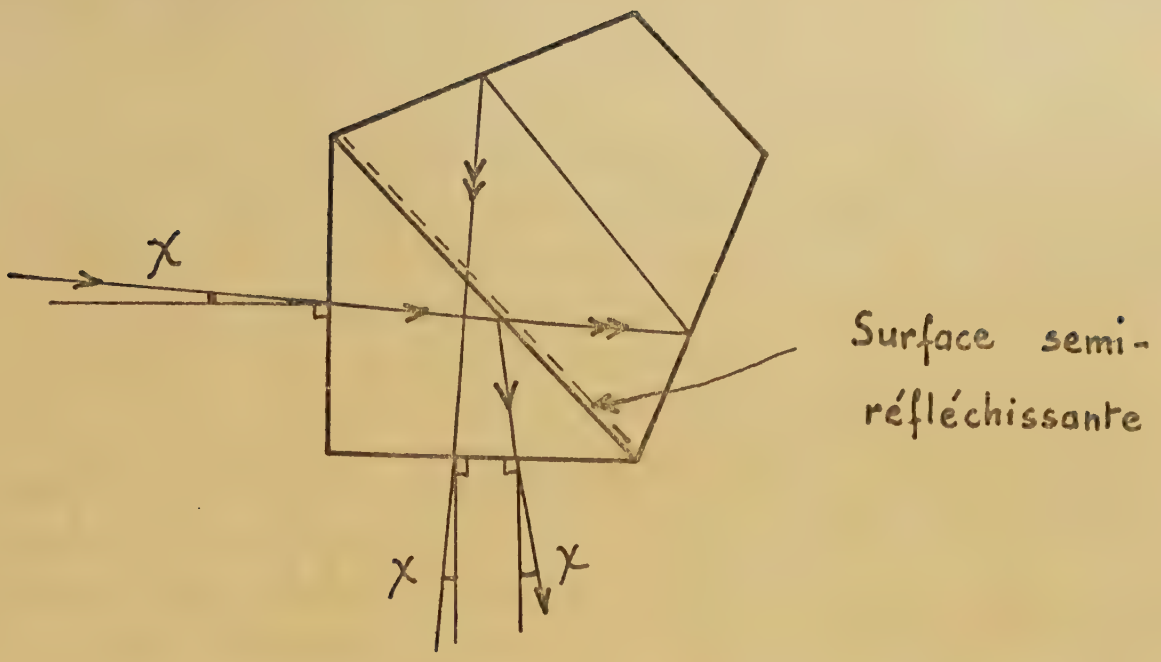


Fig. 51

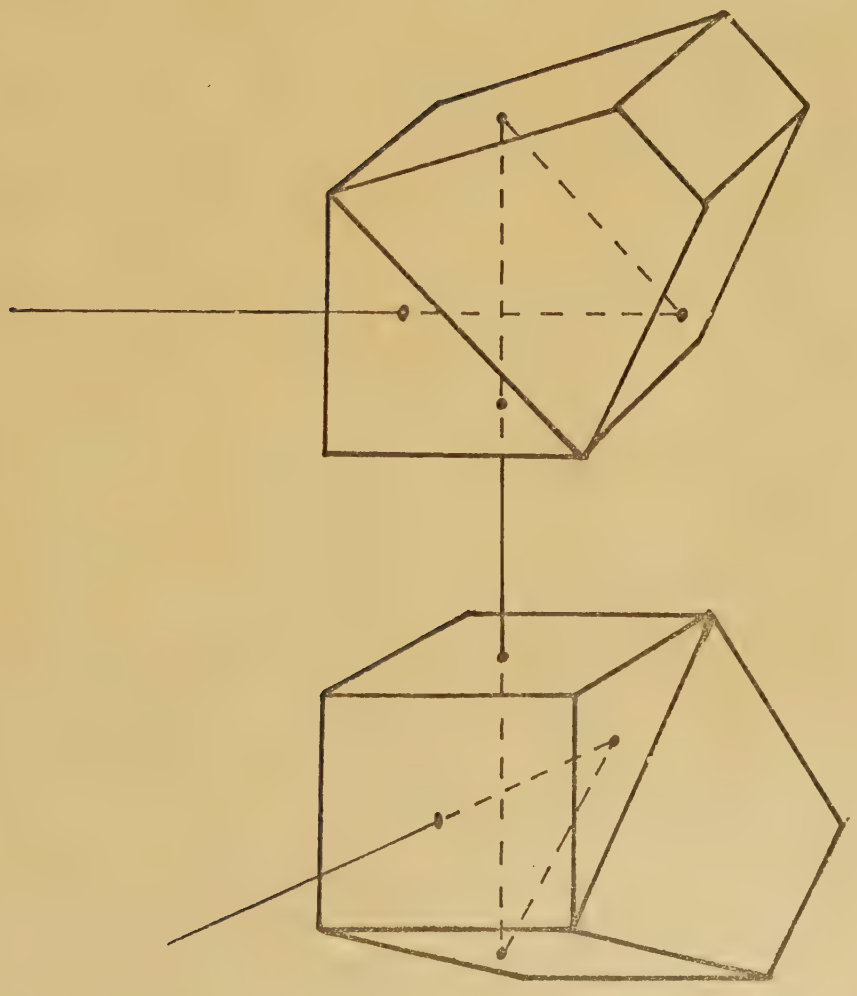


Fig. 52

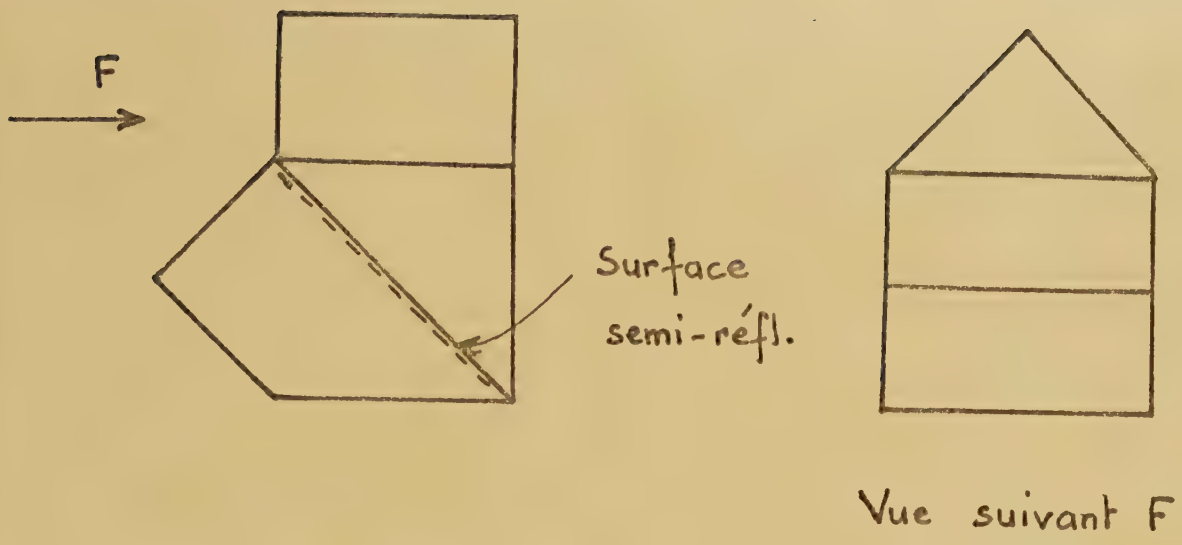


Fig. 53

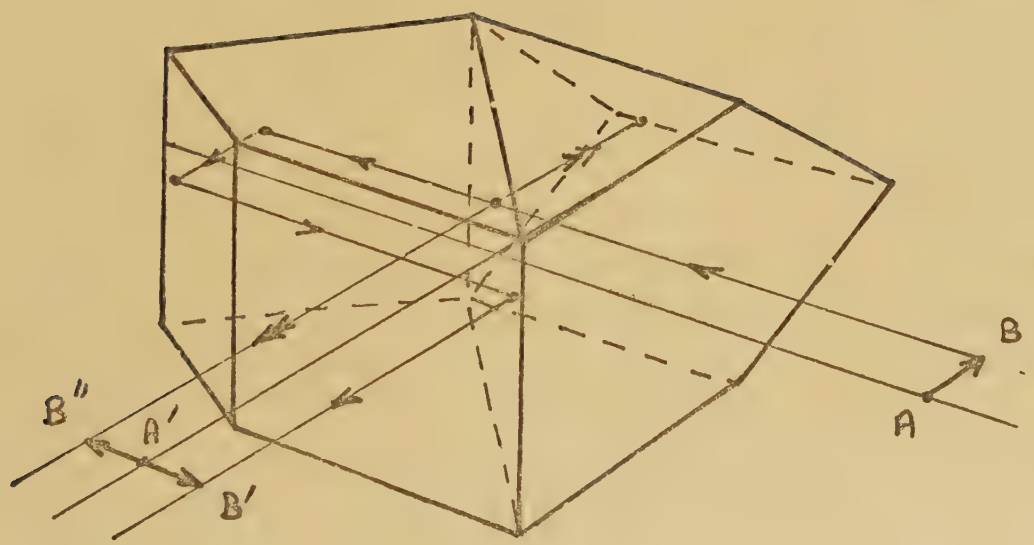


Fig. 54

Fig. 55

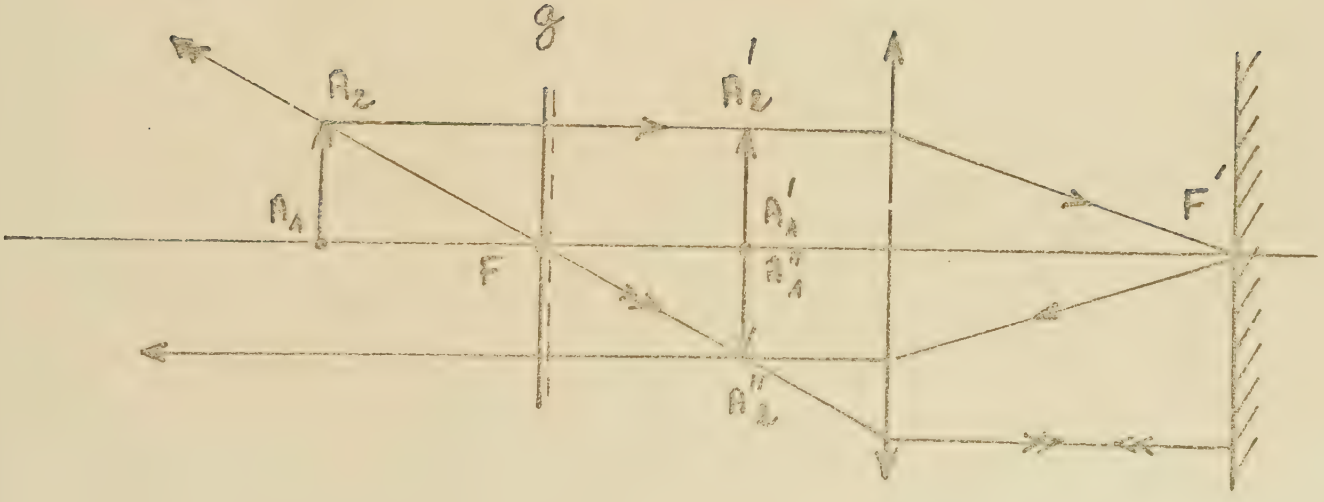


Fig. 56

* Montage expérimental :

Nous avons pu facilement expérimenter ce dispositif. Le montage est représenté à la figure 57. On remarquera que le plan semi-réfléchissant a été remplacé par le miroir m_2, perpendiculaire à l'axe de visée en F_2, symétrique de F par rapport à la séparatrice g_2 . Le faisceau d'un laser est élargi à un diamètre convenable à l'aide d'un objectif de microscope suivi d'un clairaut. Ce faisceau est renvoyé sur l'objectif à étudier par la séparatrice g_1. Les images par réflexion sur les différents dioptres sont observées avec un viseur dioptrique après le dédoublement. Les images correspondant à des dioptres différents sont échelonnées sur l'axe et elles ne sont pas nettes simultanément.

Nous avons rencontré quelques difficultés au cours du réglage de ce dispositif. Elles provenaient des images parasites dues aux séparatrices et des aberrations d'excentrement dues aux divers éléments, difficiles à régler sur un montage à éléments indépendants. Pour réduire ces défauts, il faut réaliser un montage prévoyant tous les réglages utiles, comme le préconisait J. TERRIEN, utiliser un cube séparateur ayant une face aluminée (fig. 58) à la place de l'ensemble séparatrice g_2 - miroir m_2 . Une autre difficulté provient du manque de flux. Nous n'avions à notre disposition qu'un laser Hélium-Néon de puissance 1 mW. L'utilisation du système à dédoublement avec un verre nu, donnait des images très faibles et nous avons dû faire les mesures de sensibilité avec des surfaces traitées. Pour une étude plus évoluée, il suffira d'utiliser un laser plus puissant.

* Sensibilité :

Nous avons recherché , pour des surfaces de divers rayons de courbure, la plus petite variation de réglage discernable. Nous nous intéressons comme toujours à la sensibilité angulaire. Les résultats sont les suivants :

Rayon de courbure	Sensibilité
∞	3"
83 mm (concave)	25"
34 mm (concave)	2'
34 mm (convexe)	3'

.../...

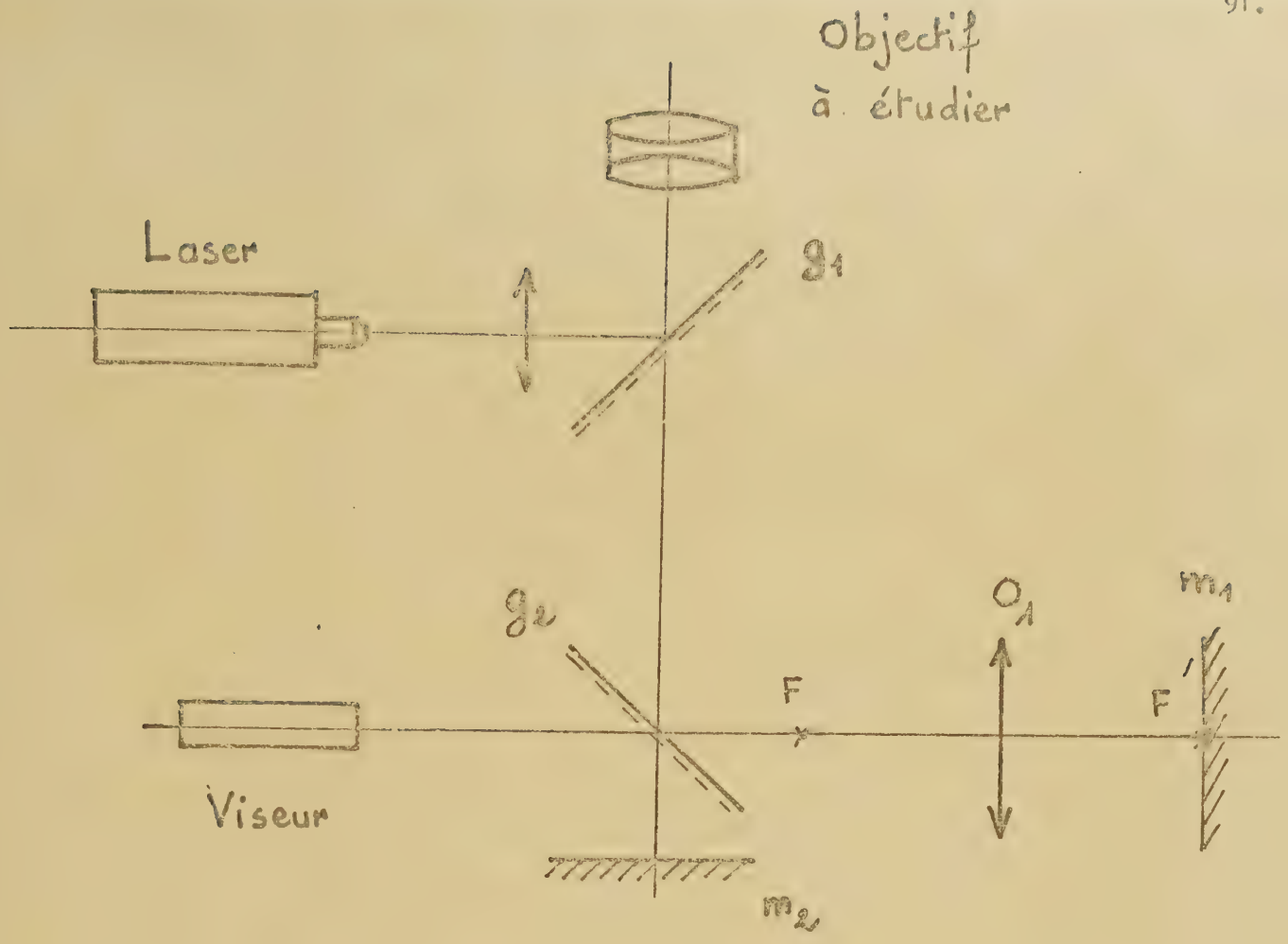

Objectif
à étudier
Laser
g_1
g_2
O_1
m_1
F
F'
Viseur
m_2

Fig. 57

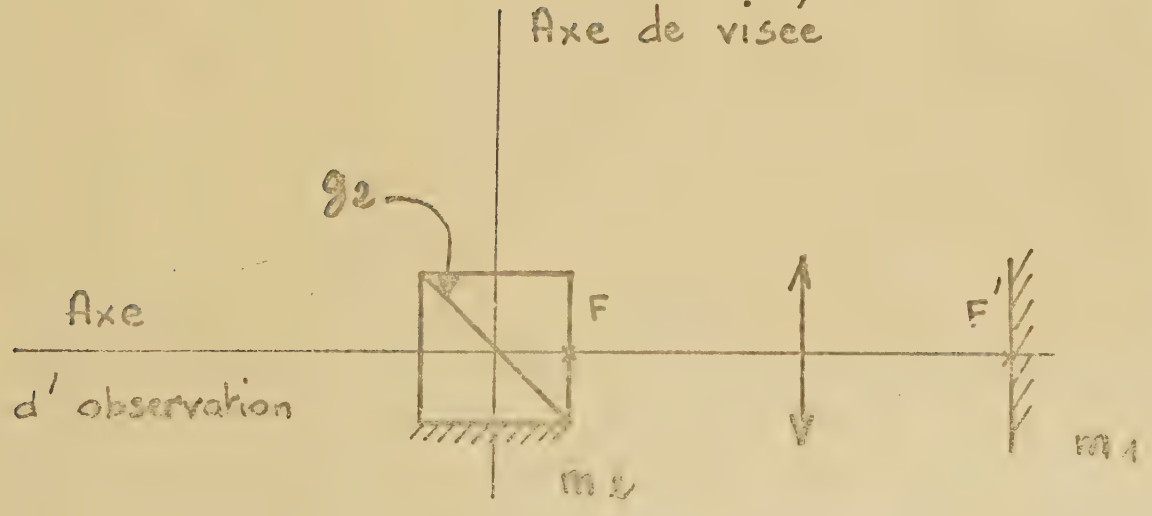
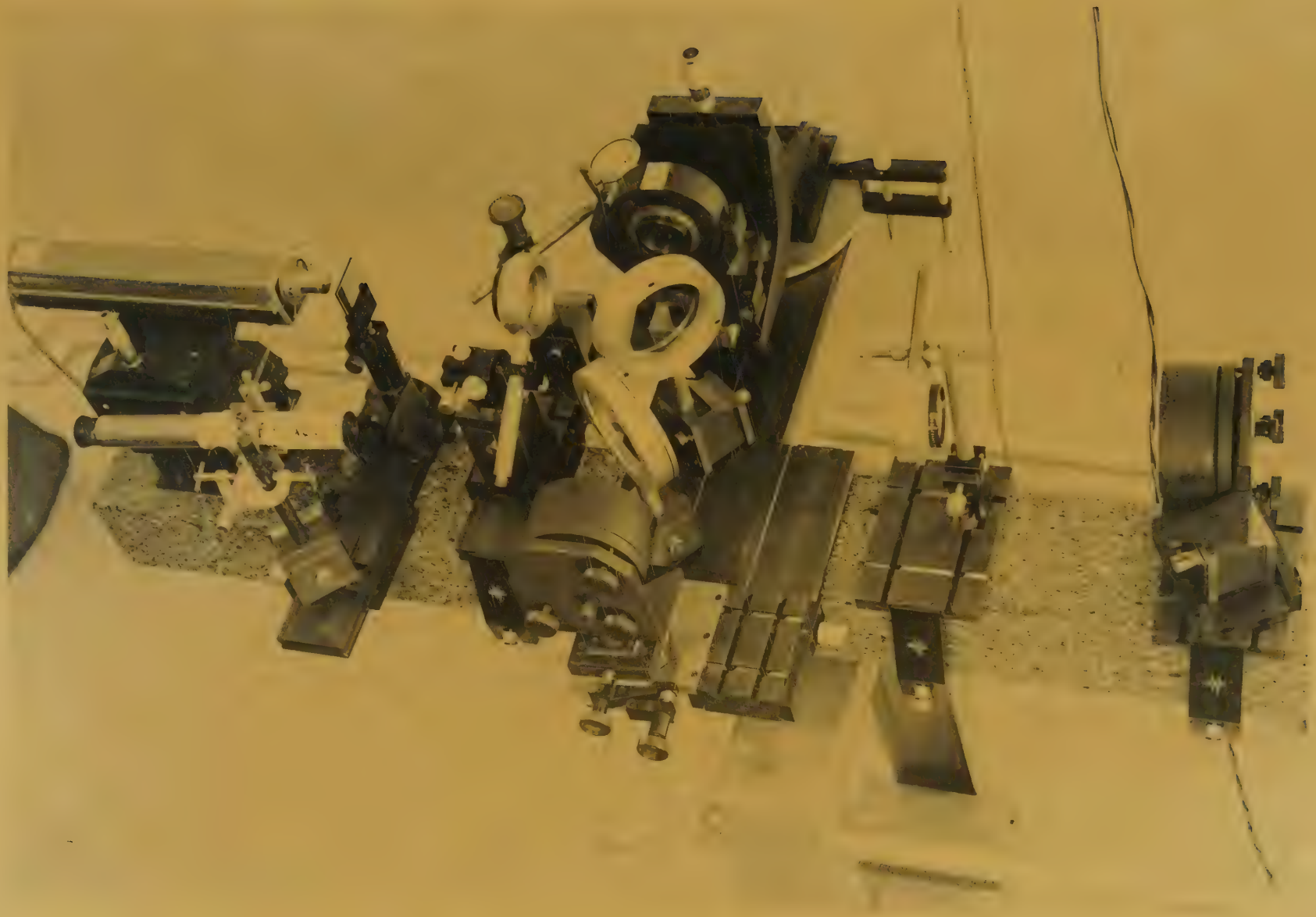

Axe de visée
g_2
Axe
d' observation
F
F'
m_2
m_1

Fig. 58



MONTAGE DU DISPOSITIF A DEDOUBLEMENT D'IMAGES

En conclusion, notre étude nous permet de proposer deux solutions au problème posé : l'"axicon" et le système à dédoublement d'image. Dans les deux cas un investissement et une étude complémentaires devraient permettre de rendre ces montages exploitables industriellement. Cependant, aucune des méthodes proposées ne permet de résoudre le difficile problème du centrage des surfaces collées.

VIII. CONCLUSION :

En améliorant les principes mécaniques des opérations de centrage et de débordage, et en étudiant une méthode de détection adaptée, cette étude nous a permis de faire progresser ces techniques. L'appareil de détection photoélectrique que nous proposons n'a pas actuellement de concurrent commercialisé pour sa précision de mesure. Après quelques modifications de détail, cet appareil pourra être utilisé dans les ateliers industriels, et nous pensons qu'il y rendra de grands services. Son utilisation est simple, et il présente autant d'intérêt pour la haute précision que pour les débordages moins précis. Il permet en effet dans les deux cas de diminuer notablement le temps des opérations, en les rendant systèmatiques. Une étude ultérieure permettrait d'apporter une solution au délicat problème du centrage des lentilles collées dans leur barillet. Pendant cette première étape, l'extension de notre procédé à cette technique d'avant-garde a été l'une de nos préoccupations.

L'interféromètre peut également rendre de précieux services. Sa précision est excellente et sa simplicité entraîne un prix de revient inférieur au procédé photoélectrique. Par contre, son domaine d'application est nettement plus restreint et il nécessite un personnel plus qualifié.

Enfin, nous avons expérimenté deux méthodes de détection de la lentille défectueuse dans un système optique monté. Cette étude, limitée à des montages de principe, a permis d'obtenir des résultats encourageants qui laissent envisager des solutions intéressantes. Une étude théorique et expérimentale plus approfondie sera nécessaire pour connaître en détail les limitations et les domaines d'application de chacune d'elles. Un appareillage intéressant les laboratoires d'optique et l'industrie pourra alors être mis au point.

ANNEXE

Calcul de la différence de marche Δ :

Dans un premier temps, nous supposerons le centre de courbure C. situé dans le plan déterminé par les deux rayons incidents que nous appelerons "plan de l'interféromètre".

Pour raisonner simplement à partir du montage décrit à la figure 26, nous utiliserons le système partiellement développé représenté à la figure I de l'annexe. Ce développement partiel a pour but de nous permettre de raisonner dans un même espace pour les deux voies incidentes et les deux voies émergentes. Une réflexion sur un miroir plan se traduit par une symétrie des espaces objet et image par rapport à ce miroir. Le rayon incident 1 i qui suit le trajet gI_1 se réfléchit sur g ; le rayon incident 2i qui suit le trajet gmI_2 subit une réflexion sur m. Le rayon émergent 2e, de trajet I_2 mg se réfléchit sur m puis sur g avant de repartir dans la direction du rayon le qui ne subit pas de réflexion sur g et m. Une symétrie par rapport à m, puis une symétrie par rapport à g ramènent donc le rayon émergent 2e dans le même espace que le rayon émergent le. On vérifie aisément que ces deux symétries ramènent également le rayon incident 2i dans le même espace que le rayon li. La composition de ces deux symétries donne une rotation de centre W et d'angle 2ψ (ψ est l'angle que font entre eux la séparatrice et le miroir et W le point d'intersection de leurs prolongements). D'après la figure I, on a $\psi = \varphi - \theta$, φ et θ étant les complémentaires des angles d'incidence du faisceau laser sur le miroir m et la séparatrice g. Considérons le triangle Agm (figure I) ; on voit que :

$$2\varphi = a + b + 2\theta \quad \text{d'où} \quad 2\psi = 2(\varphi - \theta) = a + b$$

Ceci confirme bien que l'on ramène notamment 2i sur 1 i en appliquant la rotation R (W, $2\psi = a + b$).

Sur la figure I, les éléments non primés : surface à centrer $\mathcal{L}$, centre de courbure C, foyers secondaires F_1 et F_2, etc..., sont les éléments réels. Les éléments primés se déduisent des précédents par la rotation R (W, a + b). Ce sont des éléments virtuels ; mais tout se passe pour un observateur situé en P du champ (fig.II) comme si le rayon 1 i se réfléchissait sur $\mathcal{L}$ et le rayon 2'i confondu avec 1 i se réfléchissait sur $\mathcal{L}'$.

Le faisceau laser est parallèle, donc les rayons arrivant en P semblent provenir des foyers secondaires F_1 et F'_2. La différence de marche Δ en P peut se diviser en deux termes principaux Δ_1 et Δ_2 tels que $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$.

Δ_1 = différence de chemin optique pour aller d'un point origine jusqu'en F_1 et F'_2.

Δ_2 = différence de chemin optique pour aller de F_1 en P et de F'_2 en P.

D'après la figure I, on a, en prenant l'origine des chemins optiques en H (projection de C sur le rayon incident l_i).

$$\Delta_1 = (HF'_2) - (HF_1)$$
$$= HK' + K'I'_2 + I'_2F'_2 - (HI_1 + I_1F_1)$$
$$= HK' + R + \frac{R}{2} - (R + \frac{R}{2}) = HK'$$

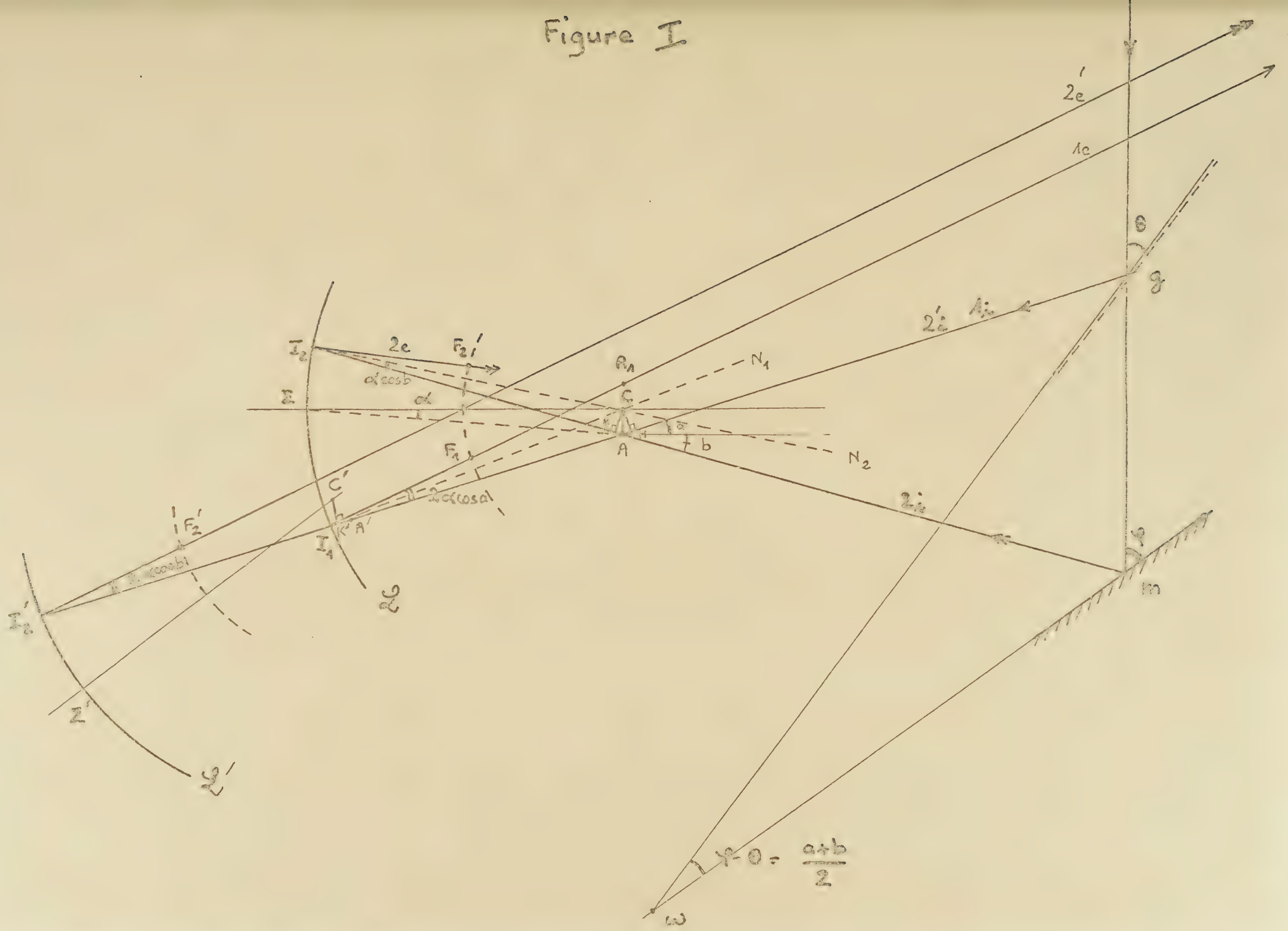
Or $CA = \alpha R$ par hypothèse.

donc $AH = \alpha R \sin a$ et $AK = \alpha R \sin b$

$HK' = HA + AA' + A'K' = HA + AA' + AK$ puisque la rotation est une isométrie.

../...

Figure I

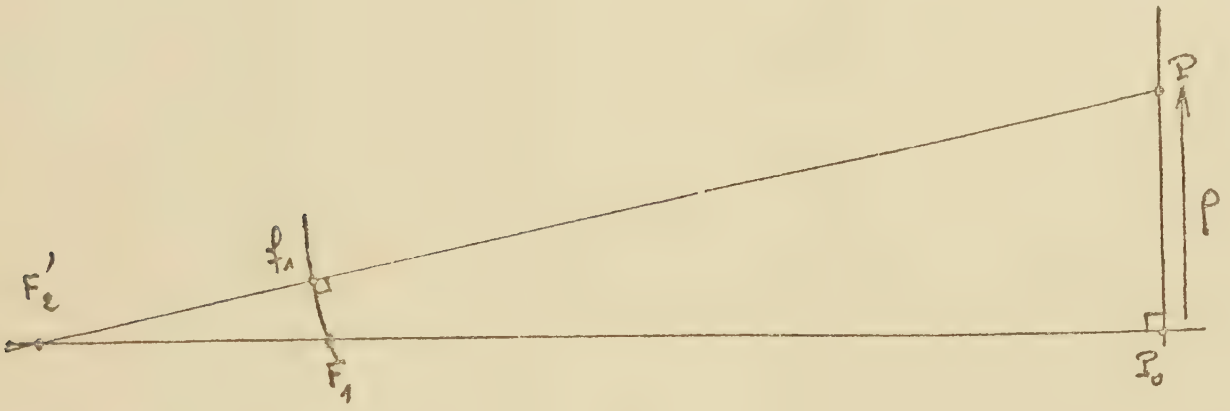

2e'
1e
θ
S
2i'n
1in
I2
2e
F2'
α cosb
Σ
α
R1
N1
C
a
b
A
N2
F1'
C'
2α cosa1
2i1
F2'
α cosb1
I1
A'
Σ'
S'
m
φ
ω
φ - θ = a+b/2

Posons AA' = d. En effet, pour une lentille donnée cette distance est constante pendant toute l'opération de centrage et ne dépend que de la géométrie du système. Il vient : $\Delta_1 = \alpha R \sin a + d + \alpha R \sin b$

$$= d + \alpha R (\sin a + \sin b)$$

Pour calculer le terme Δ_2 utilisons la figure II.

Figure II



Traçons un arc de cercle de centre P et de rayon PF_1. Cet arc de cercle coupe $F'_2 P$ en f_1. Donc $\Delta_2 = (F'_2 P) - (F_1 P) = F'_2 P - f_1 P = F'_2 f_1$. On peut par une approximation courante, considérer que $F_1 f_1$ est perpendiculaire à $F_2 P$ d'où (similitude des triangles $F'_2 f_1 F_1$ et $F'_2 P_o P$) :

$$\frac{F'_2 f_1}{F'_2 F_1} = \frac{F'_2 P_o}{F'_2 P}$$

Posons $F'_2 P_o = d_2$ et $P_o P = \rho$ distance de P à l'axe $F'_2 F_1$

Il vient $F'_2 P = \sqrt{F_2 P_o{}^2 + P_o P^2} = \sqrt{d_2{}^2 + \rho^2} = R_2 \sqrt{1 + \frac{\rho^2}{d_2{}^2}}$

et $\Delta_2 = \frac{F_2' F_1 . d_2}{2\sqrt{1 + \frac{\rho^2}{d_2{}^2}}}$

En ne s'écartant pas trop du centre du champ, on peut admettre que $\rho \ll d_2$.

Ce qui donne $\Delta_2 = F'_2 F_1 \sqrt{\frac{1}{1+\frac{\rho^2}{d_2{}^2}}} \simeq F'_2 F_1 \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{d_2{}^2}}$

et enfin $\Delta_2 \simeq F'_2 F_1 \left(1 - \frac{\rho^2}{2 d_2{}^2}\right)$,

ce qui confirme l'observation d'un système d'anneaux.

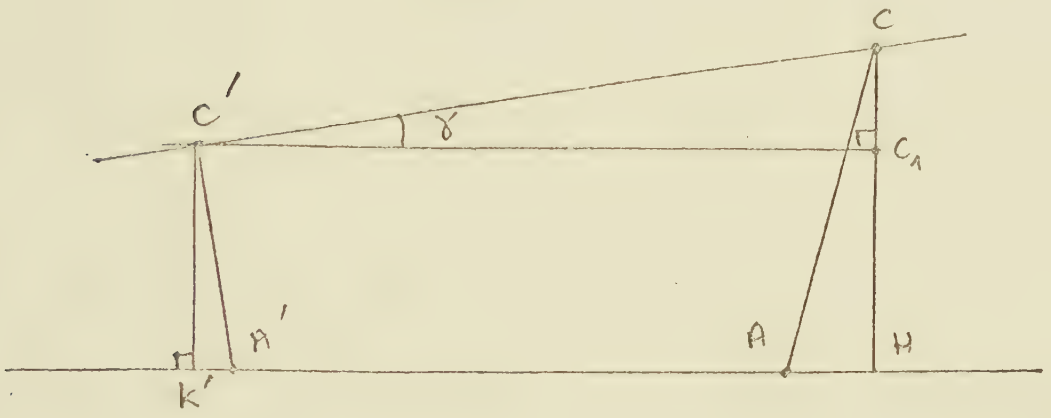
.../...

Sur l'axe F'_2F_1, donc au centre du système d'anneaux, $\Delta_2 (P_o) = F'_2F_1$

Montrons que $F'_2F_1 = C'C$. Le foyer secondaire correspondant à un faisceau parallèle incident sur un miroir sphérique est nécessairement situé sur le rayon passant par le centre de courbure, puisque ce rayon revient sur lui-même. On peut donc affirmer que CF_1 est parallèle à l i. De même $C'F'_2$ est parallèle à l i. $C'F'_2$ est donc parallèle à CF_1. Or, $CF_1 = C'F' = \frac{R}{2}$. Par suite la figure $CF_1 F'_2 C'$ est un parallélogramme et $F'_2F_1 = C'C$.

Pour calculer CC' utilisons la figure III

Figure III



$$C'C = \frac{C'C_1}{\cos\gamma} = \frac{K'H}{\cos\gamma}$$

γ est très petit donc $\gamma \sim \gamma_g \quad \gamma = \frac{CC_1}{C'C_1}$

$$\gamma = \frac{CC_1}{K'H} = \frac{CH - C'K'}{K'H} = \frac{\alpha R (\cos a - \cos b)}{d + \alpha R(\sin a + \sin b)} \sim \Gamma \alpha ,$$

Γ étant une constante, si l'on se limite au premier ordre en :

$$C'C \simeq \frac{K'H}{1 - \frac{\gamma^2}{2}} \simeq K'H \left(1 + \frac{\gamma^2}{2}\right) = \left[d + \alpha R (\sin a + \sin b)\right]\left[1 + \frac{\Gamma^2 \alpha^2}{2}\right]$$

Si on ne garde que les termes du premier ordre en α on peut écrire que $C'C = K'H$

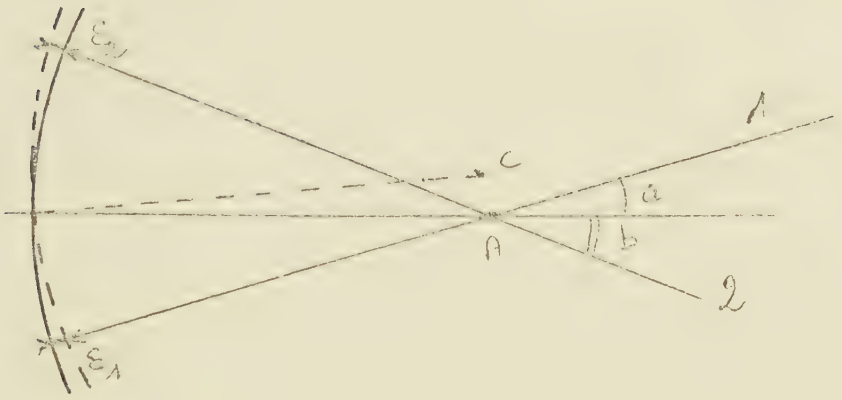
et $\Delta(P_o) = \Delta_1 + \Delta_2 (P_o) = 2 K'H$

Soit

$$\Delta(P_o) = 2d + 2\alpha R (\sin a + \sin b)$$

La partie variable Δ' de Δ peut être retrouvée à partir d'un raisonnement simple. Considérons la figure IV.

Figure IV.



On peut dire que la variation de chemin optique entre les rayons 1 et 2 est $\Delta' = 2\mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2$.

Calculons $\mathcal{E}_2$ par exemple, en utilisant la figure V. On peut considérer que cette figure est obtenue à partir du triangle $AI_2\Sigma$. On obtient le triangle $CI\Sigma$ en faisant tourner $AI_2\Sigma$ autour de Σ d'un angle α . J_2 est l'intersection de AI_2 avec le cercle de centre C et on cherche $\mathcal{E}_2 = I_2J_2$. On a d'après la figure :

$$I_2 J_2 = I_2 J \cos V$$

$$I_2 J \simeq I_2\Sigma \times \alpha$$

$$I_2\Sigma = 2\ A\Sigma \sin\frac{b}{2} = 2\ R \sin\frac{b}{2}$$

D'autre part on voit que $U + \frac{\pi}{2} + V = \pi \Rightarrow V = \frac{\pi}{2} - U$

Or $2U + b = \pi$, donc $U = \frac{\pi}{2} - \frac{b}{2}$

On en déduit : $V = \frac{b}{2}$

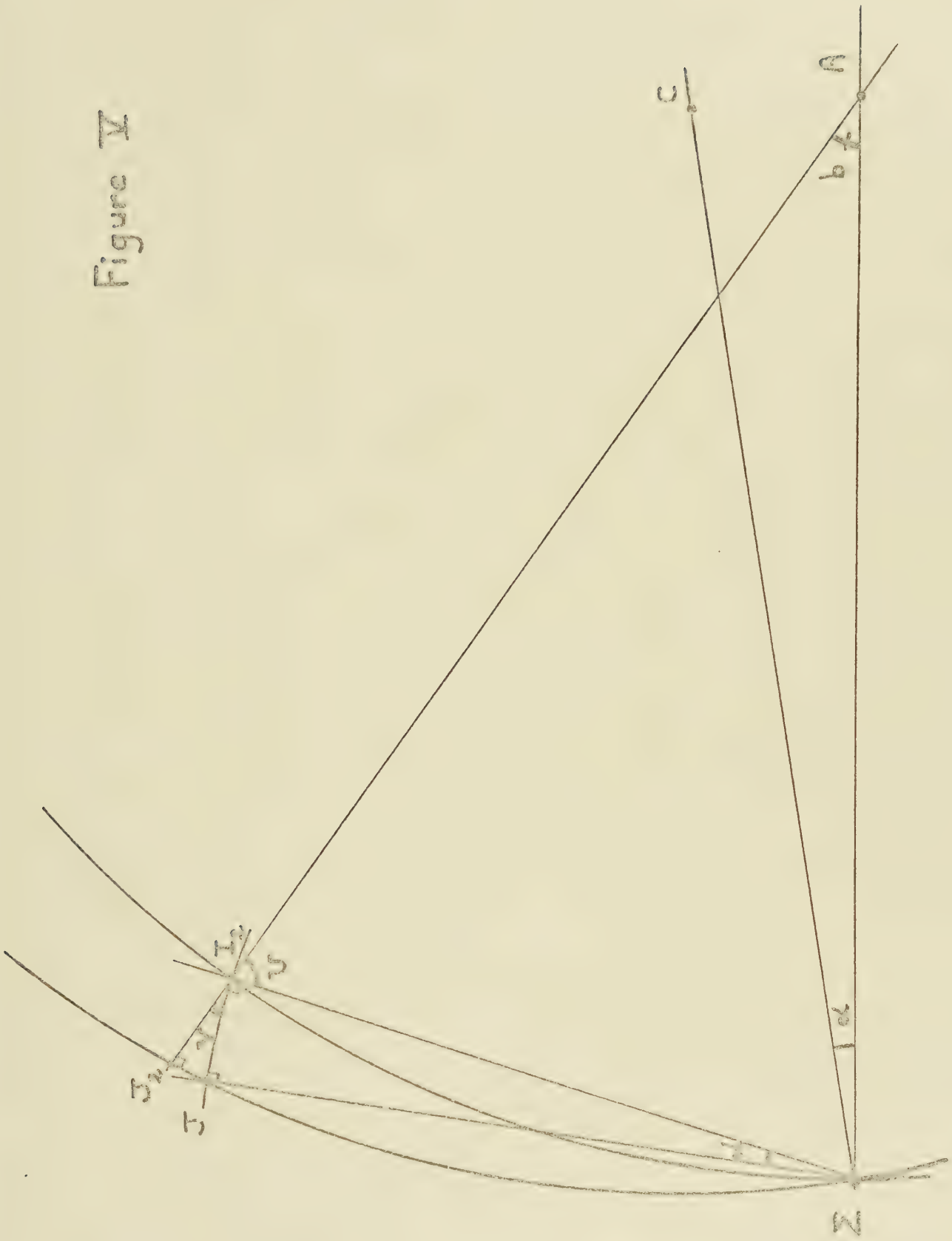
Par suite $I_2 J_2 = 2\alpha R \ \text{Sin}\ \frac{b}{2} \cos V = 2\alpha R \ \text{Sin}\ \frac{b}{2} \cos\ \frac{b}{2}$

soit $\mathcal{E}_2 = \alpha R \sin b$

De même on a : $\mathcal{E}_1 = \alpha R \ \text{Sin}\ a$, et par suite on retrouve
$\Delta' = 2\alpha R\ (\sin a + \sin b)$.

.../...

Figure IV



Nous allons utiliser ce raisonnement dans le cas où le centre de courbure C n'est plus dans le plan de l'interféromètre. En effet, il est évident que l'on peut alors calculer Δ' de la même manière, en remplaçant α par sa projection β dans ce plan. Pour l'interféromètre tout se passe comme si la surface à un instant donné avait tourné de cet angle β. En ce qui concerne le terme constant de Δ, on montre facilement qu'il se transforme en $2d \cos\alpha$, qui au 1^{er} ordre en α se réduit donc à $2d$. Par suite, nos approximations nous permettent d'écrire la formule :

$$\Delta = 2d + 2\beta R (\sin a + \sin b),$$

applicable quelle que soit la position de C par rapport au plan de l'interféromètre.

REFERENCES

[1] MARECHAL (A.). - Imagerie géométrique. Editions Rev. d'Opt., 1952, 150-158.

[2] HRADAYNATH (R.), SINGH (H.S.). - An improved technique for centring of lenses. Optik, Band 26, Heft 1, 1967/1968

[3] BELOGLAZOV (A.A.), ORNIS (A.N.). - Collimator and autocollimator systems for checking lens centering. Optical technology, 1972, 10, 637 - 643.

[4] LEITZ (Ernst) GmbH (R.F.A.). Brevet n° 2155 361. - Procédé de centrage de lentilles.

[5] TWYMANN (F.). - Optical glassworking, Editions Hilger, 1955, 85-86.

[6] HARLE (G.A.). - An interferential lens centring lathe and edging machine. J.Sci. instr., 1951, 28, 365-368.

[7] LICHODZIEWSKI (W.). - An automatic lens centering system. Optical spectra, 1969, 7-8,71-75.

[8] BIDDLES (B.J.). - The Sira-Beck lens centring gauge, 3-3, Quality Assurance in Optical engineering - published by the Sira Institute, 1973.

[9] Western Electric Company, inc. (U.S.A.). Brevet n° 2 123 362. - Procédé de centrage d'éléments optiques, appareils pour leur mise en oeuvre et éléments optiques centrés par ces procédés.

[10] NORD (Donald D.). U.S. Patent n° 3 542 476. - Interféromètric type of lens alignment apparatus.

[11] DEVE (C.). - Le travail des verres d'optique de précision. Editions Rev. d'Opt., 1949, 47-49.

[12] ARNULF (A.), FRANÇON (M.). - Mesures Optiques. Ecole Supérieure d'Optique, 26-27.

[13] RAYCES (J.L.). - Formation of axicon images. J. Opt. Soc. Amer., 1958, 8, 576.

[14] DEEVER (W.T.). - Precision measurements of optical alignment using an axicon. Annual meeting. Opt. Soc. Amer., 1972, 67.

[15] HAJDA (J.). - A new method of alignment in space. Optica Acta, 1972, 7, 569-577.

[16] PENCIOLELLI (G.). - Le contrôle optique des alignements. Rev. d'Optique. 1946 11-12, 275-277.

[17] SOKOLOVA (N.S.). - Lens decentering and deformation testing during the assembly of objectives. Optical technology, 1973, 8, 499-501.

[18] WOOTERS (G.). - Lens centering in microscope objectives. J. Opt. Soc. Amer 1950, 8, 521-523.

[19] EPSTEIN (L.I.). - The aberrations of slightly decentered optical systems. J. Opt. Soc. Amer, 1949, 10, 847.

[20] RUBEN (P.L.). - Aberrations arising from decentrations and tilts. J. Opt. Soc. Amer., 1964, 1, 45.

[21] NYPAN (.L.J.). - Méthode de la qualification d'un axe de rotation. Microtecnic, 26, 4, 232-333.

.../...

[22] POLUNOV (Yu.L.). - Position sensitive semiconductor Photodetectors. Sov. J.Opt. Technology, 1969, 2, 207-220.

[23] CARNELL (K.H.), KIDGER (M.J.), OVERILL (A.J.), READER (R.W.), REAWELL (F.C.), WELFORD (W.T.), WYNNE (C.G.). - Some experiments on precision lens centering and mounting.Optica Acta, 1974, 8, 615-629.

[24] BOLSEY (J.). U.S. Patent n° 2.352.179. - Lens centering device.

[25] INGALLS (A.L.), PESTRECOV (K.). - Centering of optical systems. J Opt. Soc. Amer., 1949, 4, 343-349.

[26] SCHUCH (K.). - Methoden zur messung der zentrierung optischer systeme. Optik, Band 16, Heft 10/11, 652-659.

[27] MUMZHIU (A.M.), STRAKUN (G.I.). - Opto electronic device for automatic positioning of transparent objects. Optical Technology, 1973, 4, 243-245.

NOTATIONS

a	angle (annexe)
A	point et repère
$\mathscr{A}$	angle de prisme
α_i	angle d'inclinaison de la face i de la lentille
b	angle (annexe)
B	Bande passante énergétique équivalente de bruit
$\mathscr{B}$	base de l'interféromètre
$\mathscr{b}$	projection de α
c	capacité d'un quadrant
C, C_i	Centre de courbure
γ	angle (annexe)
Γ^i	coefficient (annexe)
d	distance (annexe)
D	distance image du trou source - détecteur
$\mathscr{D}, \mathscr{D}'$	déviation d'un rayon
δ_i	angle de la normale en I_i à Σ_i avec l'axe zz'
Δ	différence de marche
e	charge de l'électron
E	éclairement du détecteur
$\mathscr{E}$	"encombrement" de l'interféromètre
ε	terme correctif
Δf	bande passante de filtre
F, F'	foyers
gi	séparatrice
G	étendue géométrique
H	projection de C (annexe)
I_i	point d'incidence
J_1, J_2	points (annexe)
K	projection de C (annexe)
l	lentille additionnelle
L, L'	luminances
$\mathscr{L}$	lentille

.../...

λ	longueur d'onde
$\mathcal{L}, \mathcal{L}'$	droites
m_i	miroirs
M	centre de la tache sur le détecteur
$\mathcal{M}$	miroir orientable
N_s, N_T	nappes sagittale et tangentielle de la caustique
η	sensibilité (A/W)
O_i	objectif
w	centre de rotation (annexe)
P	Point d'observation
Π	plan de symétrie
φ_i	angle polaire
ϕ	flux
r_c, r_f	résistance de charge, de fuite
R_i	rayon de courbure
$\mathcal{R}$	rayon de la tache sur le détecteur
ρ_i	rayon polaire
s_i	signaux électroniques
S_i	surface de la tache sur la quadrant n° i
$\mathcal{S}, \mathcal{S}_i$,	surfaces d'onde
σ, σ'	surface du trou source, de son image
Σ_i	surface n° i de la lentille
T_i	temps de montée
θ	1/2 angle d'ouverture
x_i, y_i	coordonnées
ξ_i, ζ_i	coordonnées